国际电气工程先进技术译丛

PEARSON

风力发电技术与工程应用

Introduction to Wind Principles

（美） Thomas E. Kissell 著

刘其辉 等译

机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

本书特色

本书的特点可总结为以下几点：

- 内容系统、难度适中，系统地介绍了风力机的原理、类型、结构以及其他与风电相关的内容；
- 表述浅白、语言通俗，尤其适合风电场工作人员培训及风电技术的教学和普及；
- 资料详尽、图文并茂，方便读者学习风电基本知识的同时，扩展视野，增长见识。

本书为在风力发电领域工作的工程人员、科研人员、在校学生提供一本有价值的参考书。本书尤其适用于需要对风力发电进行系统和全面了解的有关人员，同时适合用于教学、培训等领域。

国际电气工程先进技术译丛

风力发电技术与工程应用

Introduction to Wind Principles

（美）Thomas E. Kissell 著

刘其辉 等译

机 械 工 业 出 版 社

本书几乎涵盖了大、中、小型风力发电机运行的各方面内容。本书采用大量生动的资料和通俗易懂的文字表达方式，以风力发电机为主线，对风力发电的过程、原理、技术、设备等方面进行了系统的介绍，内容涉及许多与风力发电有关的背景和知识。本书的主要内容包括：风能简介，风能资源与风力机选址，垂直轴及水平轴风力机的运行，风力机的性能，水平轴风力机的主要部件，发电机，齿轮箱与直驱系统，电网与风电并网，塔架的形式、设计与安全；风力机设备与风电场；风电机组的安装、故障诊断与维修，风力机的电气与电子基础知识。各章节均包括大量的照片、插图以及数据表格，各章节内容可根据具体需求和目的选用。本书的特点可总结为以下几点：①内容系统、难度适中，系统地介绍了风力机的原理、类型、结构以及其他与风电相关的内容；②表达浅白、语言通俗，尤其适合风电场工作人员培训及风电技术的教学和普及；③资源详尽、图文并茂，方便读者学习风电基本知识的同时，扩展视野，增长见识。

本书为在风力发电领域工作的工程人员、科研人员、在校学生提供一本有价值的参考书。本书尤其适用于需要对风力发电进行系统和全面了解的有关人员，同时适合用于教学、培训等领域。

Authorized translation from the English language edition, entitled *Introduction to Wind Principles*, ISBN 9780132125338 by Thomas E. Kissell, published by Pearson Education, Inc, publishing as Prentice Hall, Copyright © 2011 by Pearson Education, Inc.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying, recording or by any information storage retrieval system, without permission from Pearson Education, Inc.

CHINESE SIMPLIFIED language edition published by PEARSON EDUCATION ASIA LTD., and CHINA MACHINE PRESS Copyright © 2014.

本书中文简体字版由培生教育出版公司授权机械工业出版社合作出版，未经出版者书面许可，不得以任何形式复制或抄袭本书的任何部分。

本书封面贴有 Pearson Education（培生教育出版集团）激光防伪标签。无标签者不得销售。

北京市版权局著作权合同登记　图字：01-2010-7529 号

图书在版编目（CIP）数据

风力发电技术与工程应用/（美）基赛尔（Kissell，T. E.）著；刘其辉等译. —北京：机械工业出版社，2014.8
（国际电气工程先进技术译丛）
书名原文：Introduction to wind principles
ISBN 978-7-111-47585-9

Ⅰ.①风…　Ⅱ.①基…②刘…　Ⅲ.①风力发电　Ⅳ.①TM614

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2014）第 180010 号

机械工业出版社（北京市百万庄大街 22 号　邮政编码 100037）
策划编辑：付承桂　责任编辑：王　荣　版式设计：霍永明
责任校对：刘雅娜　封面设计：马精明　责任印制：李洋
北京机工印刷厂印刷（三河市南杨庄国丰装订厂装订）
2014 年 10 月第 1 版第 1 次印刷
169mm×239mm·24.5 印张·489 千字
0001—2500册
标准书号：ISBN 978-7-111-47585-9
定价：88.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务		网络服务	
社服务中心：	（010）88361066	教材网：	http://www.cmpedu.com
销售一部：	（010）68326294	机工官网：	http://www.cmpbook.com
销售二部：	（010）88379649	机工官博：	http://weibo.com/cmp1952
读者购书热线：	（010）88379203	**封面无防伪标均为盗版**	

译 者 序

全球的能源危机与气候环境恶化是当今世界的两大难题，寻找替代常规发电方式的新能源发电技术已经成为当务之急，对于破解能源与环境难题具有重大的意义。风力发电是目前发展最迅速、技术成熟度最高、经济性最佳的一种新能源开发方式，得到了世界各国的普遍重视与积极发展。多年来，欧美等发达国家一直走在了风电发展的前列。进入21世纪以来，包括我国在内的一些国家的风电开始迅速发展，并逐渐改变了世界风电发展的格局。从2005年开始，我国的风电总装机容量连续5年实现翻番。2009年，中国以2580万kW的总累计装机容量超过德国，成为世界第二。2010年底，中国全年风力发电新增装机容量达到1600万kW，累计装机容量达到4182.7万kW，首次超过美国，跃居世界第一。从“量”上来看，我国的风电装机容量及风电设备制造业的规模在世界上已经名列前茅，但从“质”上来看，理论创新、设备制造、并网消纳等核心技术与世界先进水平还有相当大的差距。我国的风电产业要想取得健康、持续的快速发展，就应该充分考虑实际国情，力争“量”与“质”的均衡与协调发展，从基础理论、关键技术、人才培养、激励政策、市场与经济等多个方面全面提升。

近年来，针对国家对风电发展和研究的需求，有很多国外高水平风电专著被翻译出版，内容涉及建模、控制、优化、并网等多个方面，这些译著的出版对促进我国风电技术发展和人才培养起到了很好的推动作用。这些译著的一个共同特点是专注于风电某个方面，注重了“深度”而无暇顾及“广度”，这对专业人士和学者对风电进行深入研究固然有较大参考价值，但不适用于低年级学生、现场工作人员、跨领域技术人员等初学者或入门人员。风力发电系统是一个涵盖空气动力、机械、材料、电气与电子、控制、信息等多学科的复杂能量转换系统，在我国风电技术普及、教学和培训中，多年以来一直缺乏一本内容丰富、深度适中、系统全面的风电专（译）著。

由美国学者Thomas E. Kissell撰写的《Introduction of Wind Turbines》一书的翻译出版，将较好地解决上述需求和问题。本书几乎涵盖了大、中、小型风力发电机运行的各方面内容。本书采用大量生动的资料和通俗易懂的文字表达方式，以风力发电机为主线，对风力发电的过程、原理、技术、设备等方面进行了系统的介绍，内容涉及许多与风力发电有关的背景和知识。本书的主要内容包括：风能开发基本知识（第1章）；风能资源及风力机选址（第2章）；风力机的分类、原理与结构（第3、4、5章），以及发电机（第6章）；齿轮箱与直驱系统（第7章）；电网与风电并网（第8章）；风力机塔架类型及攀爬安全等（第9章）；风力机与风

电场（第10章）；风力机的安装与维护（第11章）；风力发电中的电气与电子基础（第12章）。各章节均包括大量的照片、插图以及数据表格，各章节内容可根据具体需求和目的选用。本书的特点可总结为以下几点：①内容系统、难度适中，系统地介绍了风力机的原理、类型、结构以及其他与风电相关的内容；②表述浅白、语言通俗，尤其适合风电场工作人员培训及风电技术的教学和普及；③资料详尽、图文并茂，方便读者在学习风电基本知识的同时扩展视野、增长见识。

翻译本书旨在将国外风电发展的情况和先进技术介绍给国内读者，为在风力发电领域工作的工程人员、科研人员、在校学生提供一本有价值的参考书。本书尤其适用于需要对风力发电进行系统和全面了解的有关人员，同时适合用于教学、培训等领域。需要指出的是，本书列举的实例是以美国为背景，而我国的能源、电网及风电发展特点与美国有很大不同。相对而言，我国发展风电面临的挑战更大。当然，本书论述的原理和技术同样适用于我国，值得国内读者很好地学习和借鉴。

本书初稿的翻译工作，由刘其辉及其所指导的研究生郭晓芸、侯桂欣、张雪莉、李赢、李建宁、齐桓若、韩贤岁共同完成。全书的统稿和审校工作由刘其辉完成，期间进行了反复校译和大量修改工作。在译作付梓之际，对机械工业出版社的付承桂编辑表示衷心的感谢，本书翻译加工过程中，她给予了大量帮助和建议，感谢她对该项工作的大力支持和理解！

本书翻译得到了新能源电力系统国家重点实验室（华北电力大学）自主研究课题和中央高校基本科研业务费专项资金（2014MS03）的支持和资助，也得到了华北电力大学学校和学院各级领导和老师的帮助，在此表示感谢。

由于译者水平所限，书中翻译错误和疏漏之处在所难免，恳请广大读者批评指正。

刘其辉
于华北电力大学
2014 年 5 月

原 书 前 言

本书涵盖了大、中、小型风力发电机运行的各方面内容。本书尤其适用于希望具备足够的风能知识以从事销售、安装、维修等风能技术工作的人员，通过本书的学习，不但可深入掌握风力机的安装与故障处理，而且还能够承担最复杂的风力机维护工作。本书从最基本的概念开始，由简入繁，图文并茂地解释了从叶片捕获风能到发电机将机械能转换为电能的完整过程与原理，内容包括用于偏航、变桨驱动的电气及液压系统，由传动链、齿轮箱构成的机械系统，以及实现电力变换及运行控制的电气与电子电路等。各章节中均包括大量的照片、插图以及数据表格。各章节内容可根据具体风力发电课程的需求单独或系统地采用。

章节组织

第 1 章概述了当前风力机的发展现状及发展历史，分析了美国及世界的工业、民用及商用电力负荷，论述了风能的绿色能源特性。此外，还介绍了风电融资以及当前风电项目的投资回收等内容。

第 2 章解释了风能物理特性，以及如何设计风力机以实现风能的高效转换。本章有助于学生掌握风能的所有变量参数并且能够进行风力机选址评估和风功率预测。

第 3 章介绍了垂直轴及水平轴风力机的运行原理，通过照片、插图讲述了每一种类型风力机的基本结构及其功能。通过详细论述风力机叶片的运行特性揭示了单叶片、双叶片、三叶片以及五叶片风力机的优缺点。

第 4 章讲述了风力机将风能转换为电能的原理、叶片的工作特性、不同风速下风力机的运行情况以及决定风力机最优性能的因素等内容。

第 5 章深入介绍了用于实现风能电能转换的叶片、转子、低速轴、齿轮箱、高速轴以及发电机的协调工作机理，包括实现风力机控制的偏航与变桨、用于液压及其他功能控制的可编程序控制器（PLC）、用于风力机桨叶节距控制及机械制动的比例与伺服液压控制。为了便于理解，本章提供了详细的 PLC 与液压器件的照片与插图。

第 6 章分析了交、直流电能的基本理论及交、直流电机的电磁原理。本章详细分析了同步发电机与异步发电机的运行特性，讲述了双馈发电机、永磁发电机及普通交流发电机的频率控制。通过本章的学习将为风力发电机的安装、故障诊断及维修奠定基础。

第 7 章详细介绍了齿轮箱、轴承和传动链，讲述了齿轮箱和轴承的类型与功能，分析了叶片/风轮与发电机传动轴的低、高速旋转变换关系。

第8章完整阐述了电网的基本知识，诠释了可实现电能更高效传输的“智能电网”概念，深入介绍了实现风力机与电网并网所需的开关设备与装置、用于连接风力发电机与变电站实现电能输配的地下电缆与架空线路。

第9章论述了独管式及桁架式塔架设计、水泥地基的设计与浇筑、塔架的竖立与维护。此外本章还包括塔架攀爬安全、超速安全以及防雷等方面的内容。

第10章概述了目前用于从单机应用到陆地、海上大型风电场等各种场合安装的风机，包括小型民用装置、商用装置以及大型风电场，以展示目前全球风电装机的现状。此外，还介绍了美国的十大风电场以及风电装机容量最大的州，并对其发展趋势进行了预测。

第11章介绍了安装与调试风力机的步骤、故障处理流程及特殊问题诊断，详细分析了传动链、发电机、电气、机械、PLC、液压故障的诊断方法。

第12章讲述了风力机电气部分所涉及的基本理论，包括交直流电能、三相/单相电能、有功功率、视在功率、功率因数、变压器、国家电力准则、交直流电机、基本整流/逆变电力电子技术。本章可为风力机电气部分的安装、故障处理与维修提供必要的电气知识储备。

致谢

感谢我的妻子Kathy这段时间对我的支持以及对保持本项目进度所给予的帮助。同时感谢我的女儿Kelly Starkey，她为本书术语部分作出了很多的工作。

感谢Terra社区学院的Kevin Walker、John Carpenter、Bruce Meyer、Denny Setzler、Jayne Bowersox和Kathy Elchert，他们在主题凝练、图片搜集以及初稿评价等方面给予了帮助。Terra社区学院的John Fellhauer、Curtis Stokes和Paul Schroeder在其开设的风能课程中选用了本书的部分内容并提供了反馈意见，对此向他们表示感谢。感谢俄亥俄州哥伦布Pearson高等教育的策划编辑Dan Trudden对本项目的帮助，他在本项目中给予了我莫大的指导，尤其感谢他对本书细节的关注以及为获取本书许可授权及图像资料等方面的帮助。同时也感谢Pearson高等教育的Wyatt Morris对于本书的帮助。

感谢俄亥俄州克林顿港SUREenergy & Fellhauer机械系统公司的John Fellhauer，为获取本文所需的背景信息和图像资料，他付出了大量的时间与精力，感谢他为本文提供的大量图片。

感谢为本书提供图、表资料及使用授权的下列人员及其公司：

Nova Lynx的Joseph R；

俄亥俄州草坪市P. E. 公共事业局副局长Paul G. Brock；

Boston Gear的David Brooksbank；

艾默生工业自动化输电解决市场交流部经理Jackie Catalano；

Power House Ltd. Quietrevolution Bill Currie的Steven Crosher与Philippa Rogers；

俄亥俄州克林顿港SUREenergy & Fellhauer机械系统公司的John Fellhauer；

西南风力公司图像技术支持 Michael French；

Harbor Freight Tools 总顾问 Marc Friedman；

Inventive Solutions，Solar，Wind and Environmental Technologies 的 John Gibney；

Parker Hannifin 公司铅印技术系统专家 Stephanie Havanas；

NKE AUSTRIA GmbH 的 Dick Scott 与市场部经理 Janet Mo；

Kidwind 的 Joe Rand；

北方电力系统的 CharlieVan Winkle、Chris McKay、Christoper Farage 与 Jim Stover；

Bosch Rexroth 公司的 Aaron Weida；

RM Young 公司的 Thomas Young。

感谢以下对本书进行审定的人员：

Iowa Lakes 社区学院的 Craig Evert；

Cuyahoga 社区学院的 Jim Heidenreich；

Highland 社区学院的 David Vrtol；

德克萨斯理工大学的 Richard P. Walker。

很多主题领域均与风能技术相关，并对其起到补充与支持作用，我愿意借助我正在撰写或刚脱稿的一些教科书来为学生与培训人员提供额外的参考。这些书目包括：太阳能的基本原理；工业电子、可编程序控制器的应用、测量仪表与控制、发电机及电动机控制；HVAC 电能、电子与控制系统；工业维修中的电气、液压与机械系统；工业维修中的电气与电子技术。

Thomas Kissell

目　　录

译者序
原书前言

第 1 章　风能简介 …… 1

1.1　风力机的基本结构与发电原理 …… 2
1.2　风能利用的历史 …… 5
1.3　风力机的分类 …… 7
1.4　风力机的技术规格 …… 11
1.5　风力机的标准与认证 …… 13
1.6　不间断电能供应的需求 …… 18
1.7　电力传输的制约因素 …… 19
1.8　美国的电力负荷 …… 20
1.9　美国总的日负荷 …… 23
1.10　最大负荷 …… 23
1.11　商业负荷与工业负荷 …… 24
1.12　民用负荷 …… 25
1.13　电网系统 …… 26
1.14　偏远地区的独立电源 …… 27
1.15　风能的环境和生态评估 …… 28
1.16　绿色能源技术的必要性 …… 28
1.17　风能的发展趋势 …… 29
1.18　风能的政策走向 …… 29
1.19　财政扶持和投资回报 …… 30
1.20　绿色能源投资回报期的计算 …… 31
1.21　风能的税赋考虑 …… 33
1.22　绿色技术岗位的技能需求 …… 35
1.23　风能产业的工作岗位 …… 36

第 2 章　风能资源与风力机选址 …… 42

2.1　风能的基本物理特性 …… 42
2.2　风的特性 …… 45

2.3 与风电系统相关的地理因素…… 46
2.4 风速变化…… 47
2.5 风速的季节变化和年度变化特性…… 47
2.6 风速的昼夜变化…… 47
2.7 紊流…… 48
2.8 阵风风速…… 48
2.9 极端风速…… 48
2.10 风速预测 …… 49
2.11 风场的尾流效应 …… 50
2.12 复杂地形引起的紊流 …… 52
2.13 根据需求选定风场装机容量 …… 52
2.14 如何确定一个地区的可利用风能 …… 54
2.15 影响风电的地方性法规 …… 55
2.16 风力机选址要求 …… 56
2.17 选定合适的风力机安装地点 …… 56

第 3 章 垂直轴及水平轴风力机的运行 …… 60

3.1 风力机叶片概述…… 60
3.2 风力机的类型…… 64
3.3 垂直轴风力机…… 67
3.4 水平轴风力机…… 69
3.5 叶片的几何设计…… 71
3.6 叶片的数量…… 71
3.7 叶片类型比较…… 74
3.8 单叶片、双叶片和三叶片风力机的优缺点…… 75

第 4 章 风力机的性能 …… 79

4.1 恒速运行…… 79
4.2 风力机叶片的转动原理…… 80
4.3 攻角和叶片节距角…… 80
4.4 叶片节距控制…… 80
4.5 变风速情况下风力机的运行…… 83
4.6 发电量估测…… 84
4.7 风力机测试…… 85
4.8 风力机的紊流问题…… 86
4.9 如何确定风力机的最佳性能…… 87

第 5 章 水平轴风力机的主要部件 …… 92

5.1 水平轴风力机概述…… 93
5.2 机舱和机舱底座…… 94
5.3 转子轮毂和叶片类型…… 95
5.4 叶片的数量…… 96
5.5 叶片节距控制…… 97
5.6 转速及其控制…… 99
5.7 叶片的独立变桨控制…… 99
5.8 基于负荷效率的节距控制 …… 100
5.9 偏航机构 …… 100
5.10 偏航驱动…… 101
5.11 偏航控制…… 101
5.12 偏航制动…… 102
5.13 数据采集和通信…… 102
5.14 风速计和风向仪…… 103
5.15 风力机监控和数据采集（SCADA）系统 …… 105
5.16 风力机控制系统…… 105
5.17 可编程序控制器（PLC）的基本原理…… 106
5.18 PLC 的输入与输出…… 111
5.19 PLC 模拟控制…… 113
5.20 基于 PLC 反馈控制的风力机控制 …… 115
5.21 基于 PLC 的功率控制 …… 116
5.22 叶尖速的优化…… 117
5.23 基于 PLC 的叶片转矩优化 …… 117
5.24 PLC 程序存储及永久性存储器…… 117
5.25 发电机励磁控制…… 118
5.26 液压控制…… 118
5.27 液压系统在风力机中的作用…… 118
5.28 液压泵…… 122
5.29 方向控制装置…… 127
5.30 基于液压电磁阀的电气控制…… 134
5.31 液压缸和液压马达…… 135
5.32 液压比例控制阀…… 136
5.33 风力机的制动器…… 139

第 6 章　发电机 …… 144

6.1　交流电与直流电概述 …… 145
6.2　“交流”的含义 …… 146
6.3　交流电的频率 …… 146
6.4　电磁理论介绍 …… 147
6.5　直流发电机 …… 151
6.6　交流电动机 …… 155
6.7　交流发电机 …… 160
6.8　异步交流发电机 …… 164
6.9　同步发电机 …… 165
6.10　双馈感应发电机 …… 166
6.11　永磁同步发电机 …… 166
6.12　使用交流发电机发出直流电 …… 167

第 7 章　齿轮箱与直驱系统 …… 169

7.1　齿轮箱的作用 …… 170
7.2　齿轮传动比的作用 …… 171
7.3　齿轮类型 …… 172
7.4　斜齿行星齿轮 …… 178
7.5　轴承 …… 181
7.6　差动齿轮箱与直齿圆柱齿轮 …… 188
7.7　主齿轮箱 …… 188
7.8　传动链 …… 189
7.9　直驱系统 …… 191

第 8 章　电网与风电并网 …… 195

8.1　了解电网 …… 196
8.2　智能电网 …… 200
8.3　变压器及输配电基本设备 …… 202
8.4　并网导则的原则和规范 …… 208
8.5　国家电气规范和电网其他要求 …… 208
8.6　建筑供电和居民供电 …… 209
8.7　输配电中的开关与并网 …… 210
8.8　电力部门的电能计量 …… 211
8.9　电能质量概述 …… 212

8.10 频率和电压控制 …… 213
8.11 电压、有功和无功功率 …… 214
8.12 低电压穿越 …… 215
8.13 闪变和电能质量 …… 215
8.14 接地系统 …… 216
8.15 地下线路 …… 217
8.16 电力线路敷设 …… 218
8.17 架空线路 …… 218
8.18 风电场变电站 …… 219
8.19 民用及商用单电源电力系统 …… 220

第 9 章 塔架的形式、设计与安全 …… 223

9.1 风力机塔架的类型 …… 224
9.2 塔架的基础和混凝土基座 …… 242
9.3 塔架的攀爬 …… 245
9.4 塔架工作安全及攀爬安全 …… 249
9.5 风力机的安全防雷 …… 255
9.6 超速保护和塔架过负荷控制 …… 257
9.7 塔架周边的鸟类安全 …… 260
9.8 塔架维护 …… 261

第 10 章 风力机设备与风电场 …… 264

10.1 项目开发 …… 265
10.2 风电场选址评估 …… 265
10.3 选址问题 …… 265
10.4 视觉及景观评估 …… 266
10.5 小型民用风力机 …… 267
10.6 自制风力机 …… 268
10.7 商用风力机 …… 270
10.8 风电场 …… 271
10.9 美国海上风电 …… 279
10.10 欧洲大型海上风电场 …… 279

第 11 章 风电机组的安装、故障诊断与维修 …… 284

11.1 风力机的安装步骤 …… 285
11.2 故障诊断概述 …… 296

11.3 故障诊断流程…… 298
11.4 症状与问题之间的区别…… 300
11.5 故障诊断表与故障诊断矩阵的使用…… 300
11.6 风力机转换与传动故障诊断…… 301
11.7 机械及塔架故障诊断…… 302
11.8 电气故障诊断…… 303
11.9 液压故障诊断…… 306
11.10 风电系统的周期性维护 …… 307
11.11 风力机大修 …… 310

第 12 章 风力机的电气与电子基础知识 …… 313

12.1 基本概念及简单电路…… 314
12.2 电压、电流与电阻的测量…… 319
12.3 基于欧姆定律的电压、电流与电阻计算方法…… 323
12.4 电路基础…… 327
12.5 串联电路…… 328
12.6 并联电路…… 331
12.7 串-并联电路 …… 335
12.8 电容及容性电抗…… 336
12.9 交流电路中的电阻与电感…… 338
12.10 阻抗及感性电路的阻抗计算 …… 339
12.11 交流电路中的有功功率与视在功率 …… 339
12.12 功率因数计算 …… 339
12.13 基于电抗与电容的功率因数调节 …… 340
12.14 无功功率 …… 340
12.15 三相变压器 …… 340
12.16 继电器与接触器的原理与特性 …… 344
12.17 电动机起动器的作用 …… 349
12.18 熔断器 …… 353
12.19 逆变器与电路中的电子元器件 …… 356
12.20 二极管整流技术 …… 359
12.21 发光二极管 …… 364
12.22 PNP 型与 NPN 型晶体管 …… 364
12.23 晶闸管 …… 366
12.24 三端双向晶闸管 …… 369
12.25 实现直流-交流电能变换的逆变器…… 371

第1章　风能简介

本章学习目标

读完本章后你将能够：

- 解释风力机将风能转换为电能的原理。
- 认识风力机的基本结构。
- 理解风力机的三种分类方法。
- 认识民用负荷与工业负荷对不间断电源设备的需求。
- 排除风力机的电气、液压和机械系统故障。
- 识别民用、商业、工业电力日负荷。
- 列出未来风电领域的十种工作及其所需技能。

本章关键词

美国国家标准学会（ANSI）
美国风能协会（AWEA）
英国风能协会（BWEA）
节电（Brownout）
能源部（DOE）
下风式风力机（Downwind turbine）
电力负荷（Electrical demand）
电网（Electrical grid）
欧洲风力机认证（EWTC）
齿轮箱（Gearbox）
发电机（Generator）
绿色技术（Green technology）
高速轴（High-speed shaft）
水平轴风力机（Horizontal-axis turbines）
国际电工委员会（IEC）
国际标准化组织（ISO）
逆变器（Inverter）
千瓦（Kilowatt）
低速轴（Low-speed shaft）
兆瓦（Megawatt）
机舱（Nacelle）
美国国家电气规范（NEC）
国家再生能源实验室（NREL）
电力峰荷（Peak electrical load）
电力电子变频器（Power electrical frequency converter）
投资回报（ROI）
叶轮（Rotor）
风力机叶片（Turbine blades）
型式认证（Type certification）
型式特性测量（Type characteristic measurements）
不间断电源设备（Uninterruptible power supply）
上风式风力机（Upwind turbine）
垂直轴风力机（Vertical-axis wind turbine）

本章概述

风能正在成为一种提供电力的替代能源，本章从风能利用的历史到当前现代化

风电场对风能进行了概述。本章首先讨论了风力机的不同类型，介绍了风力机的相关标准及测试系统。其次，解释了现在美国民用、商业与工业等不同领域的电力应用情况，讨论了电网的输电限制因素，介绍了美国工业与民用总的日负荷及年负荷，以及总的商业负荷、总的工业负荷与总的峰荷。再次，讨论了风力机的类型，包括直接为本地居民及小型商业应用供电的独立运行机组，以及并网运行机组。其中后者可在并网发电的同时为本地负荷供电。最后，分析了作为重要可再生能源开发方式的风电的环境、经济问题，包括发展趋势、政策走向、投资与回报以及税务，此外还讨论了风电领域可能提供的工作岗位及其技能需求。

1.1 风力机的基本结构与发电原理

1.1.1 风力机的基本结构

认识风力机的基本结构及发电原理是学习风能与风力机的重要基础。图 1-1 所示为一台小型水平轴风力机。水平轴风力机的基本结构包括安装于轮毂上的叶片、轮毂、低速轴、齿轮箱、高速轴与发电机。有时轮毂与涡轮叶片通称为风轮。风轮通过传动轴与发电机相连接，当叶片与风轮驱动转轴旋转时，后者就会带动发电机运转发电。有些风力机采用直流发电机，而有些采用交流发电机，分别发出直流、交流电能。电功率的计量单位为瓦（W），1 瓦是电压为 1 伏（V）情况下 1 安（A）的电流产生的功率。本书第 12 章将对电能的基本知识进行完整的介绍。风力发电机容量是由它所能发出的功率来表示，单位为瓦（W）。1000W 用“千瓦（kW）”表示，也就相当于 10 个 100W 灯泡的功率之和。电力公司采用“千瓦时（kW·h）”作为单位来计量用户电费，该单位表示了一段时间（1h）内以一定功率（1kW）工作时消耗的电能大小。可通过比较常用的家用电器的耗电量来更好地理解“1kW·h”的含义。例如，在工作 1h 的情况下，一台 400W 的典型自动洗衣机耗电 0.4kW·h，一台 4000W 的电动干衣机耗电 4kW·h，一台 120W 的台式计算机耗电 0.12kW·h。必须避免混淆功率与能量的概念，“W”是表示任何一瞬间电能功率大小的单位，表示该瞬间一个负荷的电压与电流的大小；“W·h”是电能的单位，可用来计量用户的耗电量和计算电费。

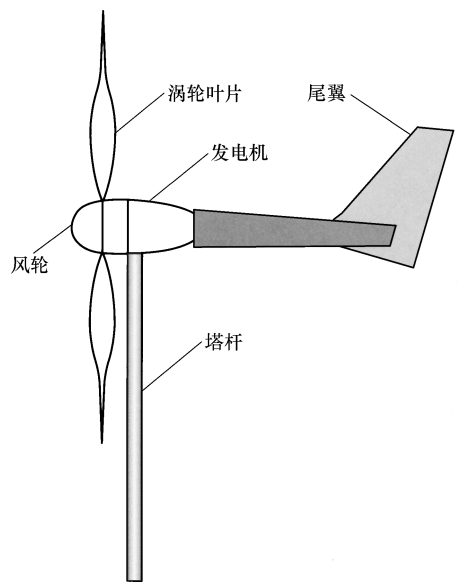


图 1-1 小型风力机的基本结构

一些大型风力发电机的容量用“兆瓦（MW）”表示，1MW = 10^6W。图 1-2、图 1-3 分别是安装在野外及海上的兆瓦级风力机的例子。当一个风电场包括大量的风力机时，它们总的输出功率可超过 1000MW，即 1 吉瓦（GW）。1GW = 10^9W（10 亿 W）、1000MW 或者 10^6kW。一个典型的美国家庭一个月和一年的用电量分别是 938kW·h 和 11256kW·h，一些节能型家庭每年大约用电 8900kW·h。典型的工业及民用负载将在 1.11 节与 1.12 节介绍。

图 1-2　野外兆瓦级风力机（图片来源：Fotolia，LLC）

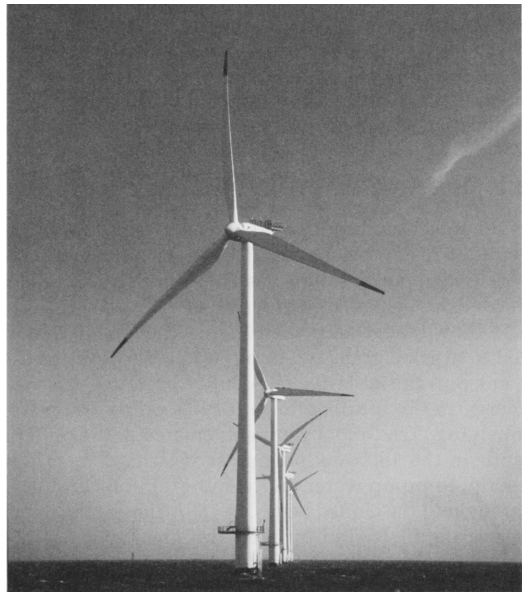


图 1-3　海上大型兆瓦级风力机（图片来源：Vestas Wind System A/S）

图 1-1 所示的小型风力机通过它的尾翼来实现对风。发电机与风轮安装在具有一定高度的塔架（塔杆）上是为了更好地获取风能，进而使其驱动叶片并带动发电机运转发电。小型风力机发出的电能可直接供给家庭或小功率应用场合，或者存

储在电池中备用。一般地，这种发电机发出的电能较少，可用于照明、烧水、电热等，在一些偏远的地区也可用来泵水。

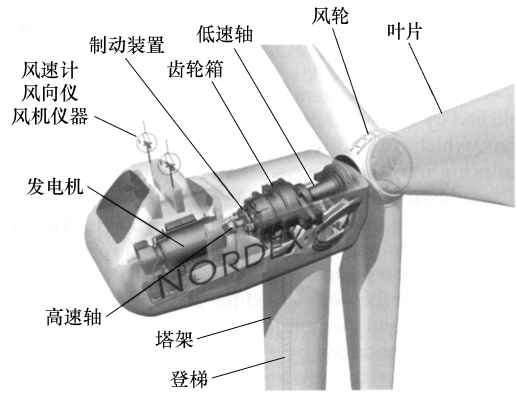


图 1-4　大型水平轴风力机的基本结构
（图片来源：Nordex ）

图 1-4 表示了大型水平轴风力机的基本结构。风力机的主要部件包括风轮、低速轴、齿轮箱、高速轴与发电机等、除风轮以外其他部件均安装在位于塔架顶端的封闭型机舱里。图中的叶片安装在与低速轴相连的轮毂上，在风能直接驱动下风轮的转速为 10 ~ 20r/min，这是“低速轴”这个名字命名的原因。齿轮箱内部包括复杂齿轮装置，可将低速轴的转速提升为 1800r/min，正是由于这个原因，连接齿轮箱与发电机的传动轴称为高速轴。低速轴、齿轮箱、高速轴与发电机安装在机舱内部，可以避免外部天气的影响。

水平轴风力机采用齿轮箱或齿轮装置将叶片的低转速转换为更高的转速，以便发电机能发出 60Hz 的交流电能。因为美国电网的频率为 60Hz，绝大多数电器与电动机的工作频率也设计为 60Hz。最佳的叶片转速为 10 ~ 20r/min，在这个转速基础上通过采用合适的齿轮箱变速比，可以使高速轴运转在发电机需要的转速下。

风力机有两种控制方法来获得发电机 60Hz 的输出频率。一种方法是控制发电机的转速，通过控制叶片节距与实现偏航使叶片加速或减速，从而合理地控制高速轴运行在可实现发电机 60Hz 频率输出的转速上。

另外一种方法是允许风轮自由运行在风力所允许的任意转速下，而将发电机输出的电能送入电力电子变流器，也就是逆变器。变流器输入任意频率和电压的单相或三相交流电能，通过整流器变换为直流，在直流环节中采用电容器和电抗器来实现稳压与滤波，最后变流器的后端部分将直流电能变换为单相或三相 60Hz 交流电能。单相与三相电能、频率与逆变器等术语知识将在第 12 章进行详细介绍。在这种类型的风力机中，叶片的转速没有被控制运行在对应风力机额定容量的工作点上，发电机可以输出任意频率与电压的电能。如果风力机输出超过其额定容量，叶片节距调节（变桨）机构将会动作以限制功率。发电机输出的变压变频的交流电能，通过逆变器变换为恒压恒频，实现发电机的并网。

为了将变流器输出的 690V 电压提升为适应电网电压的 12470V，则需要一台变压器进行电压变换。有些风电系统被设计为直接使用变流器中的直流电能，此时变流器的输出为直流电能而非交流电能。

1.1.2　风力机的发电原理

当风扫掠过水平轴风力机的叶片时，叶片在风能转换成的旋转驱动力（力矩）

的作用下开始旋转。叶片的力矩通过低速轴传递到齿轮箱，齿轮机构将转速提升到一个更高的等级。连接在高速轴另一端的发电机就会高速旋转，发出交流电能。在小型风力机中，位于风力机尾部的舵叶将使风轮实现对风。如果风向改变，则风力机就会相应地调节对风方向。

在大型风力机中，有一套能使机舱旋转实现对风的控制系统，即偏航控制机构。偏航控制机构包括一个安装在机舱底部的大型带齿圆盘和用于驱动机舱的高转矩电动机或液压马达。偏航驱动电动机具有一个齿数较少的啮合齿轮，目的是通过调整传动比来获得足够驱动机舱旋转的转矩。当偏航电动机旋转时，它将驱动安装在机舱底部的大齿轮实现风轮对风。当风速过大时，也可以通过偏航改变机舱位置使风轮偏离风向，降低风轮速度，防止转速越限。

一些风力机也采用叶片节距控制（变桨控制）来提高低风速时的机组效率，或者在高风速情况下防止机组超速，提高安全性。风力机系统是由一种称为可编程序逻辑控制器（PLC）的计算机实现控制的。PLC 接有大量用于风速、风向等信号测量的传感器，同时 PLC 也有一些用于控制叶片节距和偏航的输出通道，通过偏航，风力机可以根据实际运行条件实现对风与侧风。更多的 PLC 与水平轴风力机控制特性将在本书后续章节论述。读者应该熟记风力机所有部件的名字与功能，以便为学习风力机的发展历史与发展趋势奠定基础。

1.2　风能利用的历史

在有文字记载以来，人类就已经开始利用风能。3000 年以前，风能已被应用于短途及长途的帆船助航。有记载显示，公元前 200 年，波斯（伊朗）人开始用风能来磨米及抽水。罗马人也具有相似的风能利用历史。14 世纪，波兰人开始通过利用风能排除低洼和沼泽地区的积水来开辟新的农场。19 世纪，全美国的乡村、农场已经普遍采用风能来抽水灌溉和磨米。1887 年，Charles Brush 在俄亥俄州克里夫兰自己的家中设计并安装了用来发电的风力机，这是世界最早的风力发电机之一。表 1-1 列举了一些风能开发的历史事件。自 2000 年以后，风能利用的发展已经创造了纪录。

表 1-1　风能利用简史

年　代	事　件	提　示
公元前 1000 年	世界不同地区的大小型帆船开始出现(一些记录甚至提前到公元前 10000 年)	风能一开始用于短程的帆船,后来用于较长的航程
公元前 200 年	波斯(伊朗)风力机	主要用于磨米与抽水
公元 250 年	罗马风车	主要用于抽水

（续）

年　代	事　件	提　示
14 世纪	荷兰人用风车排干低洼地区积水	风能被广泛地用于抽干沼泽中积水以开辟更多农场
1850～1950	美国农民采用风车磨米、抽水、伐木	用风车的转轴驱动各种设备，功率一般小于 1hp㊀
1866	贝洛伊特威斯康星州风车厂建立	用于农场抽水及蒸汽机车水箱注水的风车；在电能被广泛应用之前，18 世纪 20 年代～30 年代，农场安装了数万台风车
1887～1888	第一台用来发电的自动化风力机	Charles Brush 建造了一台 12kW 的风轮直径为 50m、装有 144 个叶片的风力机；该风力机（运行了 20 年）发的电为 Brush 地下室的 408 个蓄电池充电
20 世纪 20 年代	法国人 George Darrieus 发明了称为“打蛋器风车”的垂直轴风力机	1931 年被授予美国专利
1927	Joe 与 Marcellus Jacobs 建立了 Jacobs 风力机厂	制造农用风力发电机，输出直流电为蓄电池充电
1931	苏联雅尔塔风力机	塔架高度 30m（100ft），功率 100kW，并入 6.3kV 配电系统
1934	Palmer Cosslett Putman 风力发电机	功率 1250kW，塔架高度 33.5m（110ft），风轮直径 53m（174ft）；于 1941 年建成，1945 年由于机械故障弃用
1941	第一台兆瓦级风力机	在佛蒙特州卡斯尔顿建成，叶片长度为 22.86m（75ft），并入电网
1954	第一台直接与电网相连的风力机	John Brown 公司在英国奥克尼群岛建成一台 100kW、叶片长度为 18m 的风力机
1970	美国航空航天局开始了在俄亥俄州的风力机研究	13 台用于研究的风力机实验机组投入运行
1973.10.15～1974.3.17	石油输出国组织（OPEC）石油禁运	处于对美国支持以色列的反应，欧佩克宣布不再向美国输出石油
1974	原油价格翻了四倍，每桶价格由 3 美元升为 12 美元	1977 年美国能源部成立；出台多项降低能源消耗的举措
1980	世界第一座风电场	在新罕布什尔州建立的包括 20 台风力机的风电场；由于风力机毁坏与风力不充足的原因，该风电场未能盈利
1981	7.5MW 风力机	美国航空航天局在华盛顿州建成了一台 7.5MW 的风力机，安装了当时最大的叶片
1987	3.2MW 两叶片风力机	美国航空航天局在夏威夷建成，安装了当时最大的叶片
1991	丹麦的第一台近海 Vindeby 风电场	安装有 11 台 450kW 风力机

㊀ 1hp = 745.7W，后同。

（续）

年　代	事　件	提　示
1991	英国康沃尔郡德拉博尔风电场，英国第一座近海风电场	10 台海上风力机，完全满足 2700 个家庭用电
2001	安然能源破产	安然能源在破产的时候是美国最大的风能公司之一，通用电气收购了其风能部门
2003	英国威尔士，威尔士第一座近海风电场	30 台 2MW 风力机，位于 7～8km 处的海域
2008. 6	汽油价格达到 4 美元/USgal（原油价格为每桶 140 美元）	历史上最高的原油价格使得美国汽油价格创历史最高
2008. 7	原油价格达到史前最高	原油价格超过 140 美元/桶，达到史前最高
2009	当前最长叶片的风力机，功率 6MW	安装在德国埃姆登的风轮直径达 126m（413ft）的风力机

近年影响风能产业增长的因素是用来生产汽油与其他燃料的原油价格与资源储量。1973 年与 1974 年，石油输出国组织（OPEC）减少了原油的市场供应，导致了石油价格的攀升，使用于制造汽油与发电的石油供应量减少。石油禁运引发了投资风能等替代能源的热潮，但是当石油禁运结束后石油价格跌落，供应量增加，对于替代能源的需求迅速降温。后来，在 20 世纪 80 年代，常规能源供应减少及其价格的攀升又促使全球范围内的风能研究与投资得到增长。2008 年 7 月，石油价格达到史无前例的 140 美元/桶，超过三四年之前石油价格（30 美元/桶）的 4 倍。每次石油价格的上扬，都激励风能投资的增加，最新的研究进展会不断地使风能及其他替代能源的开发和技术成本更加低廉。

在美国，对风能投资造成影响的另外一件事情是能源领域巨人——安然公司的破产，该公司在 20 世纪 90 年代后期直到 2001 年通过风力机制造及经营大型风电场获得了盈利。安然公司在风电场的巨大投资后来由通用电气收购，这帮助通用电气进一步涉入替代能源投资和“智能电网”建设等领域。智能电网中的开关设备与测量装置既可以发送信息，也可以接收信息，然而传统电网中的信息流只是单向的。本书第 8 章将讨论更多的关于智能电网的知识。

1.3　风力机的分类

风力机有两种主要类型：垂直轴风力机（VAWT）与水平轴风力机（HAWT）。水平轴风力机的效率要高于垂直轴风力机，但后者捕获风能时不受风向的影响。水平轴风力机在捕获风能之前，必须先实现对风操作。

1.3.1 垂直轴风力机

垂直轴风力机的类型很多，但主要有达里厄型与萨沃纽斯型两大类。图 1-5 为达里厄型风力机，它的形状像一个打蛋器，叶片靠升力作用旋转。“打蛋器”的设计特点使得叶片可以高于风速的转速旋转，这也意味着达里厄型风力机具有高转速和低转矩的特点，非常适合用于发电。

图 1-5 达里厄型垂直轴风力机
（图片来源：美国能源部）

达里厄型风力机的一个问题是它不能自起动，因此需要一台电动机带动叶片直到风速足够维持其运转。达里厄型风力机的优点在于，它可以在不受风向影响的情况下捕获风能并将其转换为电能。另外，该类型风力机不需要塔架，允许发电机安装在地面，方便常规维护。

达里厄型风力机可用于小型民用系统，也可用于功率高达 2.5MW 的大型系统，例如安装于加拿大魁北克 Cap-Chat 的一台风力机，其高度为 42m（137ft），直径达 34m（111ft）。

另外一台大型达里厄型风力机是 20 世纪 80 年代石油禁运后在德克萨斯州阿马里洛建成的，它由桑迪亚国家实验室与美国农业部联合经营。该风力机高度为 34m（111ft），但它已不再全天候发电。

萨沃纽斯型垂直轴风力机具有风帆或杯子形状的叶片，图 1-6 为一个小型的萨沃纽斯型垂直轴风力机。该类型风力机的优点之一是捕获风能不受风向的影响。另外，其运行非常安静，适合安装在居民区或商业区。

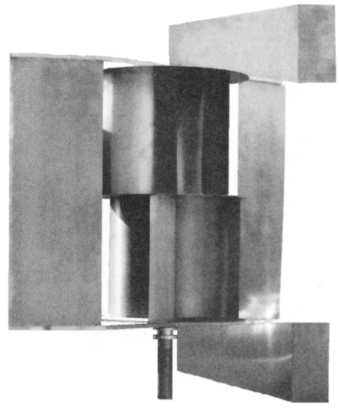


图 1-6 萨沃纽斯型垂直轴风力机
（图片来源：Inventive Solutions）

1.3.2 水平轴风力机

大部分风力机都是水平轴型的，图 1-7 显示了风电场中的水平轴风力机。水平轴风力机安装在塔杆或塔架的顶端，其叶片数量可以是 1～3 个或多个，最常见的是三叶片。风扫过叶片时带动其旋转，叶片随后驱动风轮旋转。水平轴风力机的风轮与叶片通常通过一根传动轴与发电机相连，有的在叶片与发电机之间也可

能有齿轮箱与传动系统。有可能采用齿轮箱的原因是叶片运转于非常低的速度下（10～20r/min），而发电机则需要运行于接近 1800r/min 的转速下。齿轮箱与传动系统的作用是将转速提升为 1800r/min 左右。

水平轴风力机又可进一步分为上风向式与下风向式：前者风首先扫掠过叶片，然后经过机舱；后者先经过机舱，然后扫掠过叶片。图 1-8 与图 1-9 分别给出了上风向式与下风向式水平轴风力机的例子。

图 1-7　风电场中水平轴风力机的例子
（图片来源：Vestas Wind System A/S）

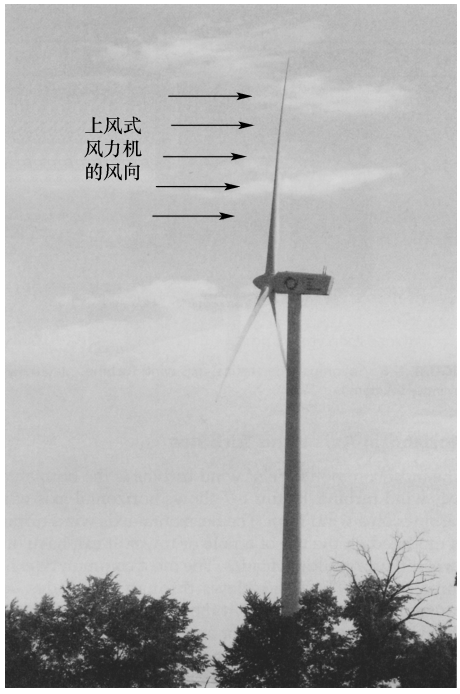


图 1-8　上风向式风力机的例子
（在上风向式风力机中，风从左方首先扫掠过叶片，然后经过位于机舱的发电机）

图 1-9　下风向式风力机的例子
（在下风向式风力机中，风首先经过机舱，然后扫掠过叶片）

上风向式风力机设计中的一个问题是风轮必须具备足够的刚度和非韧性，并且需安装在塔架前方一定距离的位置，因为在强风作用下叶片会发生一定程度的弯

曲。如果叶片位置安装距离不够，强风会导致叶片向塔架方向弯曲，叶片旋转时会被损坏。第二个问题是上风向式风力机需要采取保持风轮面向风向（对风）的措施，这由偏航机构来实现。偏航控制是风力机方向的控制，可以设计为采用尾舵实现风力机自动对风，而大型的风力机一般采用能调整机舱方位的高转矩电动机或液压马达来实现风轮对风。除了对风，偏航系统还可在风速过高的情况下使风力机偏离风向，限制大风速情况下的转速越限。

大型风力机采用主动偏航控制风轮方位以实现对风或侧风，这种主动偏航控制一般采用永磁电动机或液压马达驱动安装机舱的底盘。偏航电动机由 PLC 控制，PLC 接收自风速计和风向仪的风速信号和风向信号，并将其与风轮方位[㊀]比较。在这些大型风力机中，风轮安装在一个多速传动系统的输入端，发电机与传动系统的输出端相连。为了使发电机输出电能频率为 60Hz，一些风力机需要严格控制发电机转速。可采用偏航控制与变桨控制改变风力机相对风向的方向，从而调整风力机转速。如果风速过高，变桨控制将会调整叶片节距减少对风能的捕获，如果叶片方位的变化不足以降低风轮转速时，偏航控制将会轻微地旋转风力机以使得风轮不再处于完全对风的位置，进一步降低风力机转速直到处于安全范围内。如果风速太高，有损坏风力机叶片的危险时，制动机构就会动作实现完全制动。本书第 5 章将会详细介绍风力机及发电机的控制技术。另外一种称为直驱型机组的水平轴风力机没有变速传动环节，不需要通过控制风力机转速来获得发电机的 60Hz 电能输出，因为它利用逆变器来控制电能频率。

在下风向式风力机中，风轮连同发电机、轮毂机构均处于下风向或机舱的后端，因此叶片的弯曲将会使叶尖向远离塔架的方向移动。一些小型的下风式风力机可不需要偏航机构而实现对风，这种偏航方式称为被动偏航，它可降低系统的造价。为了避免机舱持续旋转超过一定的圈数（360°），必须对偏航旋转量进行限制与控制，否则连接发电机与地面设备的电力电缆会发生缠绕。在一些大型风力机中，偏航控制系统包括一个旋转计数器，风力机的旋转可被限制在 5 圈左右。另外一种替代方法是采用集电环，它可在风力机连续转动时保持持续的电气连接。然而，集电环也存在一定的问题：由于发电机输出的电能经过集电环到达地面，集电环磨损迅速，需要在风力机生命周期内对其保持维护。其次集电环位于塔架顶端，对其进行检查和维护需要攀爬塔架。

1.3.3 按照容量的风力机分类方法

另外一种对风力发电机的分类方法是根据它们的容量及其输出功率。根据加利福尼亚州能源委员会规定，输出功率小于 50kW 的为小型风力机，大于 50kW 且小于 500kW 的为中型风力机，大于 500kW 的为大型风力机。1990 年之前，安装的风力机大部分为中小型机组。

㊀ 原文误为“速度”，应该为“方位”。——译者注

1.3.4　按照叶片数量的风力机分类方法

风力机分类的另外一种方法是根据其叶片的数量划分，典型的水平轴风力机具有 1 ~ 3 个叶片，一些新式风力机拥有 5 个叶片。叶片越多，风力机转换的风能就越多。如果风力机只有一个叶片，则需要一个平衡装置来保证叶片旋转的稳定性。三叶片风力机是最常见的水平轴风力机，它比两叶片风力机的效率更高，但后者价格更低廉。如果提高两叶片风力机的转速，则其输出的电能也将会增加。叶片数量的增加，使得在增大风力发电机输出的同时，也会提高机组的成本。

1.3.5　风力机的其他分类方法

还可以根据风力机输出电能的利用方式对其进行分类。例如，如果风力机与电网相连，则其输出电能可直接送入电网。如果风力机独立运行，与电网没有连接，则称为独立型或离网型系统，其电能输出可供给本地居民、小型商用或小型工业用户，或者储存在蓄电池中。另外一类为联合系统，风力发电与其他可再生能源，如太阳能发电、水力发电相连接，互为补充，用于偏远地区的供电。

也可以根据安装位置对风力机进行分类。例如，风力机可通过固定型混凝土平台或浮动型平台安装在陆地上或海上。无论是位于陆上还是海上，风力机都可以单独布置或者以风电场的方式成群布置。风电场的风力机数量少则 2 ~ 10 台，多则 100 台，甚至更多。

也可以根据风力机的产权所有人及其经营目的进行分类。例如，有些风力机由私人或小型企业安装，其明确目的是为机主自身提供部分电能，另外的一些大型风力机由投资集团、公司、股份企业、城市或公共事业局建设，其目的是像火电厂或核电厂那样大规模并网发电。

1.4　风力机的技术规格

风力机的技术规格由制造厂商提供。这些技术规格可用于同类模型比较，也可为规划与安装提供重要的数据。风力机的技术规格包括的项目主要有风力机容量（MW）、叶片长度（m 或 ft）、轮毂高度（m 或 ft）和叶片扫掠面积（m^2 或 ft^2）㊀。叶片的技术规格包括转速范围、最大叶尖速和额定风速。表 1-2 列出了一些主流风力机的技术规格。

风力机的基本参数包括以 kW 或 MW 为单位的发电机输出功率，以及切入风速与切出风速。叶片的参数有风轮直径、叶片长度、叶片扫掠面积、叶尖速度和风轮转速。塔架参数有塔架高度、轮毂高度以及发电机功率曲线。其他的还会有涉及齿轮箱与传动链的参数，如果机组装配有逆变器或整流器，也会提供相关的参数。表 1-3 列出了风力机的基本参数。

㊀ 原文误为“m 或 ft”，应该为“m^2 或 ft^2”。——译者注

表 1-2 不同型号风力机的技术规格

型号	容量/MW	叶片长度①/ft	轮毂高度②/ft	总高度/ft	叶片扫掠面积/m^2	转速范围/(r/min)	最大叶尖速③/(mile㊀/h)	额定风速④/(mile/h)
GE 1.5s	1.5	116	212	328	3904	11.1~22.2	183	27
GE 1.5sl	1.5	126	262	389	4657	10.1~20.4	184	26
Vestas V82	1.65	135	230	364	5281	8.8~14.4	138	29
Vestas V90	1.8	148	262	410	6362	8.8~14.9	157	25
Vestas V100	2.75	164	262	427	7854	7.2~15.3	179	34
Vestas V90	3.0	148	262	410	6362	9~19	200	34
Gamesa G87	2.0	143	256	399	5945	9/19	194	30
Bonus(Siemens)	1.3	102	223	325	3019	13/19	138	31
Bonus(Siemens)	2.0	125	197	322	4536	11/17	151	34
Bonus(Siemens)	2.3	135	262	398	5333	11/17	164	34
Suzlon 950	0.95	105	213	318	3217	13.9/20.8	156	25
Suzlon S64	1.25	105	240	344	3217	13.9/20.8	156	27
Suzlon S88	2.1	144	262	407	6082	× ×	× ×	31
Clipper Liberty	2.5	146	262	409	6221	9.7~15.5	163	26
Repower MM92	2.0	152	328	480	6720	7.8~15.0	163	25

注：表中数据来源于厂家的产品说明书与美国风能协会。

① 本参数为实际风轮直径的一半。因为叶片需安装在大的轮毂上，因此叶片纯长度大概短 1m 左右。

② 轮毂（塔架）高度可能变化较多，本表列出的为最常用的数据。

③ 最大叶尖速（mile/h）= 风轮直径（m）× π × 转速（r/min）÷ 26.82。

④ 额定风速是对应风力机额定功率输出的风速。例如，当风速为 27mile/h 或更高时，GE1.5s 型风力机能输出 1.5MW 功率。但风速降低时，输出功率将以指数规律下降。

表 1-3 风力机基本参数

发电机输出功率	kW 或 MW
切入风速	m/s 或 mile/h
切出风速	m/s 或 mile/h
叶片长度	m 或 ft
风轮直径	m 或 ft
风轮速度	m/s 或 mile/h
叶尖速度	m/s 或 mile/h
转向	顺时针或逆时针
轮毂高度	m 或 ft
塔架高度	m 或 ft
变桨与偏航控制类型	液压或电气
制动系统类型	液压或电气
发电机功率曲线	特定风速下的发电机输出
桨叶-发电机连接	齿轮箱,传动链,直接驱动
水平轴风力机类型	上风向式或下风向式
电气控制类型	逆变器或整流器

除了上述内容，风力机的其他参数还包括：额定功率、风轮直径、功率调节类别（电气变桨或液压变桨）、叶片速度和风力机运行地点（陆上或海上）等。如果

㊀ 1mile = 1609.344m，后同。

风力机包括诸如变桨和偏航控制系统，还要区分控制类型是液压还是电气。最后，制动器和制动系统还包括一些有关的参数。

1.5　风力机的标准与认证

伴随着第一代风力机的制造、装配与运行，风力机标准与认证的问题也就产生了。风力机标准是其在设计、制造、装配、运行过程中必须满足的一系列被认同的规范，是风力机安全设计与安全运行的保障。风力机标准同时明确了风力机的使用寿命、巡检周期及维护频率。风力机标准与认证的最大问题是由哪些机构与组织设定标准，由谁来检测与认证。因为除了美国与加拿大外，世界上还有很多国家可以设计、制造风力机，所以有时很难确定一个系统必须满足哪类标准。此外，小容量风力机与为电网供电的大容量风力机的标准差别会很大。很多政府机构，包括美国能源部（DOE）以及世界上其他部门，都有针对电气系统、塔架等风力机部件的标准。本节将对认证的必要性、认证组织以及认证的内容进行介绍。

认证的必要性包括很多方面，包括（但不局限于）以下内容：

1）标准可以便于购买者比较不同风力机的输出、容量以及设计寿命。

2）通过标准，为购买风力机提供金融支持或贷款的机构能够估计风力机的工作寿命，评估风力机工作寿命期间内需要的维护工作量。

3）标准与认证可以提供安全、功能与耐用方面的最低要求，可以保护客户免受不法厂商及不满足标准的产品的伤害。

4）发电及输出方面的标准可以帮助电力公司确保风力机所发的电不会带来电网方面的问题，如果发出的电能用来供给当地居民或公司，则要确保其具备与电网一样的电能质量而不损坏用电设备。

5）标准有助于保证风力机能够具备所期望的特性，例如在一定成本约束下的质量、环境友好性、安全、可靠性、效率和零部件可更换性。

需要注意的是，一台风力机满足认证标准并不意味着“担保”，只表明该风力机满足最基本的认证标准，为风力机提供认证及测试的机构是委托的。其次，风力机制造、安装的质量验证工作可以由内部稽查人员完成，也可以由认证机构的人员完成。再次，风力机安装后的追踪随访会帮助人们建立一个关于可能导致故障、影响风力机寿命问题或有助于风力机安全与健康运行问题的数据库，这些信息可以用来修改认证项目或创建新标准。最后，风力机设计、制造、安装等各个方面均需要在合理的工程实践指导下进行。

1.5.1　美国国家可再生能源实验室风力机认证

美国国家风能技术中心采用了由美国国家可再生能源实验室（NREL）提出的风力机认证规范，该规范被称为型式认证。型式认证确保一种通过容量、外形、用途定义的特定类型风力机按照一定标准或技术要求来设计和制造。这种认证也包括

在风力机安装、运行和维护过程中完成的额外评估，以确保所有功能的实现均能满足设计标准。同一类型的所有风力机均需要型式认证，以表明它们与设计评估、型式测试、制造需求的符合程度。还有一种名为类型特性测试的认证，它属于附加的、可选的认证类别。

设计评估可能包括以下评估内容：

- 控制与保护系统；
- 负荷与负荷工况；
- 结构部件；
- 机械与电气部件；
- 设计、制造与安装计划；
- 维护计划；
- 人员安全。

型式认证项目包括：

- 安全及功能测试；
- 动态测试；
- 叶片测试；
- 负荷测试；
- 单个零部件测试。

制造整合性评价包括：

- 质量系统的检查与评价；
- 保证正确制造流程与步骤的设计文件的落实；
- 应用质量检查要点的审核检查。

类型特性测试的项目是可选的，其结果必须符合国际电工委员会（IEC）1400标准（后文介绍），其测试项目包括：

- 功率性能测试；
- 输出电能质量测试；
- 听觉或其他噪声测量。

1.5.2 美国风能协会标准

美国风能协会（AWEA）是一个包括风能项目开发商、设备提供商、服务商、零部件制造商、电网、科研人员及其他风能工业领域企事业单位在内的风能工业贸易组织，于1974年在华盛顿成立。AWEA已为风力机硬件性能方面建立了一些标准，其中部分基于IEC标准。这些标准涉及风力机功率曲线、年度发电量性能曲线、合理的应力水平等方面，其中强度与安全测试、持久性测试均用“通过/不通过”来表示。

AWEA也对其他一些安全措施与操作方法进行评价，包括风力机运行程序、高风区防止危险操作的系统和/或条款、在紧急情况或维修时用于减速或停机的方

法、维持风力机运行寿命的流程与方案、零部件更换流程、系统对于冬天或极寒地区等低温条件导致的控制功能失效的敏感程度。

通过一些基本标准，用户可以按照年发电量和容量来对风力机进行比较。年发电量的计算是折算到5m/s（11.2mile/h）平均风速条件下，噪声水平标准应该不超过5m/s（11.2mile/h）风速水平的5%，而风力机可能输出额定功率对应的风速为11m/s（24.6mile/h）。

AWEA已被为多个工业领域产品推荐标准的美国国家标准学会（ANSI）指定为风力机标准的制定单位，从而AWEA被认为是美国领先的风能标准组织。风力机硬件性能标准是AWEA的标准之一。

1.5.3　风力机安全测试的计算机辅助设计与建模

近年来计算机建模发展迅速，使用该技术可以实现风力机的所有部件和所有运行状况的模拟。计算机测试可以计算出风力机所有部件的应力，如桨叶和传动链。这些测试可模拟风力机的基本运行情况，直到风力机部件损坏。通过测试结果，制造商可以对诸如桨叶可以承受的最大风速之类的内容进行预测。因此，基于该方法就可以确定一台特定风力机应该能够满足的标准，或者对零部件进行薄弱点强化设计。

计算机程序可以通过有限元分析（FEA）求解一系列的数学方程，来决定一个单独零部件或整台风力机的安全运行范围。FEA也可以用来计算一个可能导致零部件失效或崩溃的临界工作点。计算机仿真程序的强大作用已经使其成为风力机标准和认证的有机组成部分。

1.5.4　小型风力机的认证

对小型风力机与为电网供电的大型风力机的要求是不一样的。小型风力机认证委员会（SWCC）是一个为小型风力机提供认证的独立机构，它确保小型风力机能够满足或超过在性能、坚固性、安全性等方面的认证要求。SWCC小型风力机认证为风力机能量与噪声性能提供了北美通用标准。

SWCC从事的另一个工作是关于为风力机提供直观标签，这些标签能够标明的内容有：年发电量、额定功率、最大噪声水平。该标签的另一个作用是明确风力机能够满足坚固性和安全性方面的要求。SWCC已经将它的认证标准提交给美国风能协会以获取支持。

1.5.5　北美和欧洲的标准化组织

美国与加拿大有很多历史悠久的标准化组织，其中一些组织提出的标准已经应用于风电。这些组织包括：美国保险商试验所（UL）、加拿大标准化组织（CSA）、国际能源机构（IEA）、国际标准化组织（ISO）、国际电工委员会（IEC）、美国国家标准学会（ANSI）以及其他机构。这些组织在为风力机每个零部件推荐相应的标准以确保系统的安全性、坚固性和可靠性中发挥了作用。有些标准（如安全性）已执行多年，而有些专门针对风力机的标准则出现得相对较晚。

1.5.6 美国的认证机构

作为隶属于美国能源部的国家实验室，美国可再生能源实验室（NREL）是美国可以提供认证的机构之一。NREL 创建了名为 FAST 的风力机设计规范。FAST 可以提供疲劳、空气动力学、结构、扰动方面的设计依据，它也是一个可以预测双叶片和三叶片水平轴风力机极限载荷和疲劳载荷的高性能空气弹力学仿真器。

第二个被称为 ADAMS 的风力机认证程序采用 MSC 软件开发，用于机械系统的自动化动态分析。该程序是一个通用的、具有无限自由度的多体系系统动力学分析软件，同样也适用于模拟机器人、卫星和汽车。该模拟软件可以用来在风力机装配、安装之前进行测试，也允许技术人员除了对完全装配好的系统进行测试外，还可对风力机部件的各方面进行测试。

根据能源部提供的信息，ADAMS 比 FAST 运行速度慢，但功能更广。DOE 表明，FAST 适用于多数水平轴风力机；带有空气动力学特性的 ADAMS 则可模拟几乎所有类型的水平轴风力机。上面两种程序均需要空气动力学函数库来实现空气动力特性的模拟。

1.5.7 国家电气规范与美国保险商试验所

国家电气规范（NEC）由美国防火保护协会（NFPA）提出，目的是为电气火灾预防及安全提供标准。NFPA 成立于 1896 年，是一个非营利性国际协会。NEC 是 NFPA 70 规范的一部分，NFPA70 规范每三年更新一次。在美国，风力机所有的电气系统、线路（包括电气面板）、开关、发电机控制必须遵循 NEC。NEC 还要求电气元器件及线路必须正确接地，以保护人身安全，防止电击危险。

NEC 与其他一些机构如美国保险商试验所（UL）提出的规范相配合共同保证电气安全，例如，NEC 280 号文与 UL 1449 共同用于防雷保护及涌流。风力机通常是其所处区域的最高独立性结构，这使其在工作寿命期间内具有较高的雷击可能性。美国保险商试验所已经颁布了防止雷击造成损失和破坏的标准（UL 1449）。UL 也为电力逆变器提供了标准（UL 1741）。有些风力机采用电力逆变器将发电机输出的电压变换为 60Hz。后续章节将会介绍更多的标准和规范。

1.5.8 美国标准学会

美国标准学会（ANSI）是一个成立于 1918 年的民间组织，其成员包括一些民间非营利性组织。ANSI 标准被认为是一种开放式的标准，因为所有的相关者都可帮助发展该标准。一些标准制定组织的目标就是其标准被 ANSI 接受。ANSI 授权那些开发了被广为认同的标准的组织，并帮助确保标准开发者之间的统一。ANSI 也致力于发现能利用自己的体系去创建并维护标准的组织，例如为风力机创建性能标准的 AWEA。

1.5.9 美国以外的认证机构

因为大量的风力机都是在美国以外生产的，因此欧洲担负了风力机认证的创建、管理等重要职责。位于德国汉堡的劳埃德船级社（GL）已成为世界最大的风

力机认证机构。GL 具有超过 100 年的对大型船舶及其他大规模设备认证的历史，现在 GL 是世界上领先的可为风场、风力机及其部件进行认证的组织。它既可以提供项目认证，也可以提供型式认证。

1.5.10　欧洲风力机认证及英国风能协会

在欧洲，制造和/或安装的风力机可以进行欧洲风力涡轮机认证（EWTC），该标准是专门针对欧洲风力机及其应用领域的。在英国，类似的认证工作由英国风能协会完成。

英国认证包括性能标准及安全标准，这些标准为小型风力机的制造提供安全、容量、性能、可靠性、噪声等特性的评估。小型风力机标准是从由国际电工委员会（IEC）制定的大型风力机标准发展而来的。

1.5.11　国际标准化组织

国际标准化组织（ISO）是世界上最大的标准开发与颁布者，部分 ISO 标准与风力机有关。ISO 是由世界上 159 个国家的标准化机构构成的一个网络化组织。总体上讲，ISO 系统涵盖了行业所有关键过程的一系列流程，包括确保高效的监控流程设计方法、流程记录、缺陷及校正行为检查、促进产品质量不断提高的质量系统和工序常规审查。这就意味着，如果一个风力机制造商通过 ISO 认证，它肯定采用了质量流程改进程序。

1.5.12　国际电工委员会的风力机标准

国际电工委员会（IEC）于 1906 年 6 月在英国伦敦成立，其目的是为全世界电气工业提供通用标准。因为风力机的主要功能是发电，因此可以适用很多 IEC 标准。IEC 同时也与世界上其他标准化组织有合作关系。

表 1-4 给出了一些有关风力机的 IEC 标准范例，也即 IEC 风能标准。该表列举出了典型标准、标题范围、标准召集人。

表 1-4　IEC 风能标准

工作组	标题	召集人	开发起始时间	完成(计划或实际)时间	目标	标准号
WG-1 WG-2 WG-3	大型风力机安全要求	R. Sherwin, AWEA, 美国	09/1989	12/1993	定义设计要求的原则性标准	IEC 1400-1[①]
WG-4	小型风力机系统	F. Van Hulle, 荷兰能源研究中心（ECN）	02/1992	01/1994	定义小型风力机设计要求的原则性标准	IEC 1400-2[①]
WG-5	噪声污染测量技术	T. J. DuBois, 美国	11/1992	09/1998	定义噪声测量的方法	IEC 1400-11[①]
WG-6	性能测试技术	T. Pedersen, Riso 国家实验室, 丹麦	11/1992	01/1998	定义性能测试技术	IEC 1400-12[①]

（续）

工作组	标题	召集人	开发起始时间	完成(计划或实际)时间	目标	标准号
WG-7	IEC 1400-1 修订版	P. H. Madsen, Riso 国家实验室,丹麦	03/1994	01/1999	IEC 1400-1 第 2 版	1400-1 第 2 版
WG-8	叶片结构测试	D. van Delft, TU Delft,荷兰	03/1994	1999	定义叶片结构测试方法	1400 – 23
WG-9	风力机认证的要求	J. McGuire, LIoyds Register,英国	10/1995	1999	定义认证需求(多个欧洲标准的协调版本)	1400 – 22
WG-10	电能质量检测	J. O. Tande, Riso 国家实验室,丹麦	02/1996	1999	定义电能质量检测技术	1400 – 21
WG-11	结构载荷检测	F. Van Hulle,荷兰能源研究中心(ECN)	02/1996	1999	定义运行载荷的检测方法	

① 已颁布标准。

1.6 不间断电能供应的需求

采用风能发电的一个问题是大部分地区风力的不连续性。风速可能在某些白天时间达到 30mile/h，也可能在晚上减弱为仅能维持叶片旋转的风速。因为在一天的所有时间以及一周内所有日子内，风速不可能保持不变，因此由风能产生的电能必须储存或采用其他形式的电能作为补充。

今天，电话、电灯、加热器、空调器以及电冰箱都需要电能，这些电器已从原来的奢侈品变为现在人类健康和安全所需的必备品。警务部门和公共安全部门需要电能实现通信和开展工作，食品店和家庭需要电冰箱来保存食物以防止变质，许多家庭和小型企业需要电能去操作计算机，商店需要借助使用电能的计算机和电话线完成信贷和其他财务交易，银行等金融机构需要电能来维持其网络正常运转。

很多工业领域需要大量稳定的电能来生产产品、加工食品、化工生产以及开展其他工业活动。其中很多工序，例如炼钢、化工、制药，都是不能中断的连续过程。因此，为其供电的电源必须连续并且足够满足其需要。

由于现代风力机是提前建成的，采用传统电源作为风电的有益补充实现上存在困难。在一些情况下，人们仅仅是把风力机并入电网发电以减少煤炭、石油等矿物燃料的消耗。这个问题（不稳定性）不单是风电特有的，对于光伏发电和水电也是如此。光伏发电在夜晚和阴雨天气不能正常发电，而水电在干旱少雨季节的发电量也会减少。

1.6.1 应对风电输出不稳定的措施

如果采用一台小型风力机来为偏远地区的居民、住宅或农场供电，可以用一些

蓄电池组来储存风力充足时的电能，然后当风力变弱时再为负荷供电。在使用过程中，必须实时监测电池以防止过度充电或过度放电。有些小型风力发电机需要一个较小的电压来控制发电机的励磁电流，这种类型的发电机必须连接到电网或电池组以保证获得持续的电压。如果一个电源系统采用了蓄电池组，就必须相应地设置一个投切开关以便于在蓄电池完全放电之前将其从负荷断开，这样当风力减弱到最小水平时可以为发电机励磁控制提供必要的电压。如果蓄电池完全放电，不能为发电机提供励磁电流的话，在风力的驱动下发电机虽然会旋转，但在励磁电流重新建立前不会发出电能。基于这个原因，一些没有接入电网或没有装备蓄电池的风力机均采用不需要外部励磁电流的永磁发电机。

另外一种方法是采用一块小功率光伏电池板来帮助蓄电池维持在能满足发电励磁需要的最低充电状态。当风力不足以驱动叶片的最坏情况下，蓄电池可以为负荷供电。如果蓄电池放电到低于维持发电机励磁电流的水平，光伏电池板可以为蓄电池进行充电，使其恢复到能满足发电机励磁需要的水平以上。

对于一个采用蓄电池储存电能并且需要交流电压供电的家庭或小型商业场所，还需要一台逆变器将蓄电池提供的直流电压变换为交流电压。新一代性能更好，并且能够承受深度放电的蓄电池正在研发中，一些采用大电容作为储能元件的研究工作也已完成。这些新技术将会扩展储能在解决风电输出波动中的作用。

1.7　电力传输的制约因素

风电的另一个问题是发电机输出的交流电能往往需要通过最远超过 300 ~ 400mile 的距离集中输送。这意味着风力机最好安装到靠近用电负荷的区域，但该区域往往不拥有最好的风力资源。

一般情况下，发电地点发出的是交流电能，为了输送至消耗电能的负荷区域，还要经过一系列升压变压器变换为合适的电压水平。输电电压等级取决于电能输送距离，对于较远输送距离，电压需要被升压至 765kV 或 500kV；对于中等距离，需要升压至 345kV 或 230kV，近距离输电需要升至 138kV 或 69kV。

当电能被输送至负荷目的地后，位于城市周边或靠近大型工业用户的变电站就会将电压降到 69kV 或 26kV，以方便进行电能的区域配送。如果是居民区或小型商业区，电压将被降至 13kV 或 4kV，用来进一步提供终端工业用户所需的 240/208V 电压以及终端居民、商业用户所需的 240/120V 电压。图 1-10 表示了一个典型电能输送模式中的电压等级。

电能输送的限制条件决定了风力机的安装地点和变压器的电压水平。有些风力机需要更大的升压变压器以得到满足最远至 400mile 的长距离输电需要的电压水平。现在设计、应用功率高达 6MW 的大容量风力机，并采用风场将不同安装地点的风力机连接在一起，通过一台升压变压器和输电线路将电能送出的研究工作正在

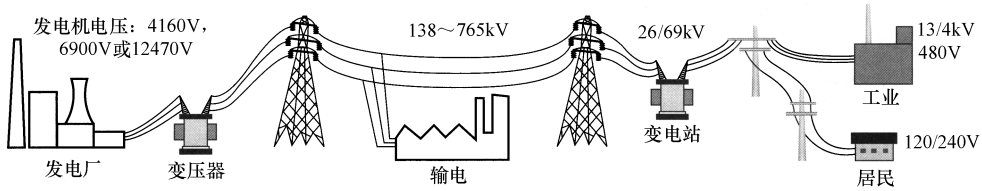


图 1-10　典型电能配送系统；标示出在每一地点的电压等级

进行中。

1.8　美国的电力负荷

为了便于理解风能如何为独立用户或电网提供电力，首先需要了解美国工业、商业和居民对用电的巨大需求。电力负荷由好几个部分组成，而总电力负荷可以通过计量一个小时、一天、一周、一个月或者一年时间区段内所有用户消耗的电能而得到。理解电力负荷的一个重要的原因是，在电能被消耗之前，燃烧或转换一次能源来驱动发电机往往需要几个小时的时间，这意味着电力公司为了顺利地将产生所需要电能的一次能源安排到位，必须提前几个小时对负荷进行预测。对于风电来说，这不是一个大问题，因为只要有足够的风就能随时发电，并将发出的电能即刻送入电网。

另一个计算电力负荷的方法是将用户进行分类：工业用户，一个区域内的工业之和；商业用户，包括因照明、空调器、冰箱而需要大量电能的大型百货商店、大型或小型商业区域、商场及其他店铺，商业用户还包括小型商业；最后一类是居民用户，在一些地区居民负荷可能会等于工业负荷或商业负荷。

然而，另外一种电力负荷计算的方法是确定每一天的峰荷。例如，对于大型工业用户来说，因为机器需要在一天的早间起动，用电高峰会到来，在接下来的时间由于并非所有的机器设备都需要运行，负荷会有所降低。这类负荷在工作日要高于周末。

电力负荷也可以通过一年的时间计算。对于美国东部和东南部的一些州来说，在漫长的夏季，空调器使用时间很长，电力负荷会更高。当天气凉爽后，空调器被关闭，电能消耗大量减少。

当学习风力发电时，有两点需要值得注意：一是电力负荷的波动性，二是由风况条件决定的风力机发电量的波动性。这两种波动因素使得采用风能供电的问题更为复杂。

表 1-5 为近期的美国电力负荷数据。该表列出了 2008 年、2009 年数以十亿千瓦时（kW·h）的日平均负荷，以及 2010 年的预测数据。从表中可以看出，2008 年居民用电的日平均负荷为 3.51×10^{9}kW·h，而 2010 年居民用电的日平均负荷的

预测值为 3.82×10^9kW · h。2008 年商业用电的日平均负荷为 3.64×10^9kW · h，而 2010 年商业用电的日平均负荷的预测值为 3.70×10^9kW · h。2008 年工业用电的日平均负荷为 2.49×10^9kW · h，而 2010 年工业用电的日平均负荷的预测值为 2.56×10^9kW · h。2008 年交通运输行业用电，包括电气化铁路及其他电气驱动的交通领域，其日平均负荷为 2×10^7kW · h，而 2010 年相应的预测数据则保持不变。

表 1-5　美国电力的分类消耗

能源信息管理机构的短期能源预测(2009 年 3 月)			
电能消耗/(10^9kW · h/日)	2008	2009	2010(预计)
民用领域	3.51	3.79	3.82
商用领域	3.64	3.71	3.70
工业领域	2.49	2.74	2.56
交通运输领域	0.02	0.02	0.02
发电厂内部用电	0.43	0.40	0.41
总的电能消耗	10.06	10.67	10.49
总的电能零售量	9.66	10.26	10.10

注：表中数据来源于美国能源部能源信息机构。

发电厂内部用电的一行表示的是发电厂内部消耗的电量，包括冷却水泵系统、火电厂煤粉输送带等设备消耗的电能。2008 年发电厂内部用电日负荷是 4.3×10^8kW · h，而 2010 年预计为 4.0×10^8kW · h。

总体上，2008 年美国的所有日平均负荷之和为 1.006×10^{10}kW · h，2009 年升高为 1.067×10^{10}kW · h，2010 年预计所有日平均负荷之和达到 1.01×10^{10}kW · h。表 1-5 最后一行是美国相应年份的日平均售电量，2008 年日平均售电量为 9.66×10^9kW · h，2010 年预测数据是 1.01×10^{10}kW · h。

1.8.1　电力装机总容量

关于美国用电情况的另外一个信息是电力装机容量。表 1-6 显示了所有发电设备的装机容量之和，包括 1980 年以及 2001 ~ 2006 年连续 6 年的数据。这些装机容量的数字包括了（采用煤炭、天然气、石油的）火电、核电、水电、风电和光伏。从表中可以看出，1980 年装机容量为 5.79×10^8kW，2006 年已经升高至 1.139×10^9kW。这种趋势表明电力负荷是逐年递增的，为满足未来的发展要求，电力装机必须满足负荷增长的需要。

表 1-6　美国所有发电设备的总体装机容量　（单位：10^9kW）

1980	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006
0.579	0.942	0.981	1.040	1.089	1.110	1.128	1.139

注：表中数据来源于美国能源部能源信息机构。

1.8.2　美国的火力发电及其他类型发电方式

关于美国发电量的下一个需要了解的问题是发电采用的一次能源和发电类型。表1-7给出了按照一次能源划分的发电类型，以及基于十亿千瓦时单位表示的每类发电方式的日发电量。根据该表，可以将风电与其他发电方式进行比较。2006年发电量最高的是火电，日发电量达到5.397×10^{9}kW·h；第二位是核电，日发电量为2.157×10^{9}kW·h，天然气发电位居第三，日发电量为2.012×10^{9}kW·h。其他的非可再生能源发电方式可以采用的能源包括（除天然气外的）其他可燃气体、石油、残渣油、馏出燃料油、煤焦油、其他原油和抽水蓄能，它们的日发电量之和为3×10^{8}kW·h。

表1-7将可再生能源发电方式单独列出来，2006年常规水电的日发电量为7.84×10^{8}kW·h，风电为7.3×10^{7}kW·h，地热发电为4×10^{7}kW·h，废木生物质发电为2.8×10^{7}kW·h，光伏发电为1.0×10^{6}kW·h。

2008年常规水电的日发电量为7.15×10^{8}kW·h，风电为1.27×10^{8}kW·h，地热发电为4.1×10^{7}kW·h，废木生物质发电为3.0×10^{7}kW·h，光伏发电为2.0×10^{6}kW·h。从2006～2008年，风电日发电量从7.3×10^{7}kW·h增加为1.27×10^{8}kW·h，计划2010年达到2.08×10^{8}kW·h，大概增长为原来的3倍。

虽然风力发电的发展速度非常迅速，但是2006年，7.3×10^{7}kW·h的风电发电量仅占该年总发电量（1.1136×10^{10}kW·h）很小的一部分。2010年计划发电量为2.08×10^{8}kW·h，将会占本年度计划发电量（1.1324×10^{10}kW·h）的比例为2%。

表1-7　美国的火力发电及其他类型发电方式

发电类型	2006	2007	2008	2009(计划)	2010(计划)
非可再生能源					
煤炭	5.397	5.475	5.392	5.273	5.255
天然气	2.012	2.232	2.169	2.195	2.236
其他可燃气	0.012	0.011	0.012	0.011	0.012
石油	0.164	0.168	0.116	0.139	0.164
残渣油	0.093	0.104	0.061	0.062	0.066
馏出燃料油	0.018	0.022	0.018	0.018	0.019
煤焦油	0.049	0.038	0.034	0.056	0.077
其他原油	0.003	0.004	0.003	0.002	0.002
核能	2.157	2.209	2.2	2.209	2.218
抽水蓄能	-0.018	-0.019	-0.017	-0.016	-0.016
其他燃料	0.019	0.019	0.02	0.022	0.023
可再生能源					
常规水电	0.784	0.674	0.715	0.684	0.717
地热	0.04	0.04	0.041	0.043	0.043
太阳能	0.001	0.002	0.002	0.003	0.004
风能	0.073	0.094	0.127	0.156	0.208
木料及废木	0.028	0.029	0.003	0.03	0.03
其他可再生能源	0.038	0.039	0.039	0.042	0.044
小计	10.707	10.974	10.845	10.79	10.937

发电类型	2006	2007	2008	2009(计划)	2010(计划)
商业领域					
煤炭	0.004	0.004	0.004	0.003	0.004
天然气	0.012	0.012	0.012	0.012	0.012
石油	0.001	0.001	0	0.001	0.001
其他燃料	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002
可再生能源	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004
小计	0.023	0.023	0.023	0.022	0.023
工业领域					
煤炭	0.053	0.046	0.047	0.045	0.047
天然气	0.213	0.213	0.2	0.189	0.194
其他可燃气	0.027	0.026	0.026	0.025	0.026
石油	0.012	0.012	0.007	0.009	0.01
其他燃料	0.014	0.013	0.007	0.007	0.007
可再生能源					
常规水电	0.008	0.004	0.005	0.005	0.005
木料及废木	0.078	0.077	0.075	0.072	0.074
其他可再生能源	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002
小计	0.406	0.392	0.371	0.354	0.365
合计	11.136	11.388	11.239	11.166	11.324

注：本表数据来源于美国能源部能源信息机构。

1.9　美国总的日负荷

与一年中时间区段以及地理区域有关，每一个星期、每一个月的美国日负荷都会变化。在一天里，负荷也会随着时间的不同而变化。例如，白天电力负荷可能达到最高，当深夜人们睡眠后，负荷将显著降低。在美国南部、东南部及西南部，空调器是最耗电的民用设备之一，因此夏天的民用负荷比冬天要高。日负荷的另一个重要的组成部分是由大型工业企业构成的工业负荷，在一天的时间内，该类负荷比较稳定，但是如果这些工厂没有发挥全产能的话，周六及周日的负荷将会变化很大。同样，当工作进程不是很紧张时，工业负荷在傍晚和深夜也会有少量的波动。

商业负荷主要是由商店、商场构成的，在一天的每一个时刻，在一周的每一天商业负荷都会发生变化。例如，商店一般可能在上午九点开门营业，晚上九点关门打烊，在这个时间段内负荷应该是最大的，其他时间负荷将会小很多。

满足这种波动性负荷需要的一个关键是要时刻调整所发的电能以跟踪负荷的变化。这就意味着，对于像煤电、核电这样通过热能发电的发电厂，必须在所需要电量发出之前的几个小时调整好一次能源输入的数量。

1.10　最大负荷

最大负荷与平均负荷是有差别的。最大负荷可以持续几个小时的高负荷状态，也可以在其他时间变为一个低负荷状态（低于 30%）。最大负荷是在一个给定的时

间内所需要的最大的电力需求。一个电力系统的容量要设计的足够大，以满足具有时间不确定性的最大负荷。

美国最大负荷出现的一个特点是按照时区“掠过”整个国家。例如，在位于中时区的东海岸，最大负荷的到来比西海岸要早一个或两个小时，这种现象被称为“滚动峰荷”。当大城市及工业用户开始一天忙碌的早晨，以及当晚上东海岸的城市和工厂比西海岸早关停一个或两个小时的时候，这种现象同样也很明显。有一种最大负荷会在城市里的照明灯具亮起的傍晚时刻发生，但这个时间会随着季节而变化：夏天，美国北半部城市的傍晚降临的比较晚，但冬天将会早得多。因此，电力公司必须按照随时间变化的最大负荷来安排发电计划。

在过去的几十年中，电力公司已经安装了很多能够迅速起动的发电机组，这些采用天然气或石油作为燃料的机组称为“调峰系统”。这些系统可以快速点火起动，在最大负荷出现的时候能在很短的时间内输出大量的电能。

这些机组的燃烧过程清洁，对环境的影响很小。它们一般安装在多余负荷出现的地方，如大型工业厂矿集中地，或者夏天需要大量空调制冷的城市。调峰机组在一般情况下不工作，但由于采用天然气为燃料，可以在需要的时候快速起动并投入工作。调峰机组也可能会在大型煤电或核电机组需要关停的情况下用到，这些机组能够很容易地发出额外的电能，同样也可用来补偿风电输出的波动性。

1.11 商业负荷与工业负荷

在一个电力系统中，商业负荷与工业负荷大约占据总发电量的 60%，它们是电力消耗的一个巨大组成部分，但是这两类负荷的可预测性较好。当经济状况良好时，商业负荷与工业负荷会呈现缓慢上升的态势；当经济状况衰退时，如 2009 年发生的世界范围内的经济衰退，该类负荷就会下降。这类负荷可能减少的一个原因是社会对商品需求的降低，工业订单将会在短时期内明显减少甚至完全取消。电力最大负荷是研究电力负荷时必须考虑的一个重要因素，它是在一个月或一个星期的 24 小时周期内任一小时所需要的最大的电能。在每一个州的不同地方，最大电力负荷是不同的：工业区域内的最大负荷会很大，主要出现在周一到周五的时间内；而在城市，电力负荷主要由是商业负荷（商场与商店）构成，周五和周六负荷会更大，因为周末的时候照明及空调器等负荷较高。

1.11.1 欠电压

当电力负荷超过电力供应时，电力系统的电压就会降低。这种低电压的情况称作欠电压，它会对用电设备或其他电力系统负荷造成损坏。对于电压偏差没有一个严格的规定，一般地认为电压降落到典型供电电压的 8% ~12% 以内。这种现象一般发生在负荷过高的情况下，像酷热的夏季，或者电力系统发生故障的情况，如交通事故造成的电力倒杆事件，或者大风引起的树木碰断一根或多根电力线的事件。

1.11.2　切负荷

在有些情况下，由于负荷过大或者冰灾、风暴等极端天气情况引起输电系统的一部分遭到破坏时，欠电压会持续好几天。如果欠电压持续时间过长，则电力公司必须起动调峰机组或者切除某些地方的负荷。在加利福尼亚的一些地方，电力公司通过滚动限电的方式帮助电压恢复到标准水平。在滚动限电过程中，电力公司会提前计划并通知一些公司和城市，将会在短时间切断它们的电源以保证其他用户的用电。电力公司也会要求用户在这个时间段内尽可能地关断更多的用电设备。在某个时间段内某个区域的供电会被停止，经过一定时间后该区域就会恢复供电，而同时，另一个区域开始一定时间的限电。通过这种方式，电力公司就可以在发电量不足的情况下保持电力系统正常运行。

另外一种解决电能供需矛盾的方法是与一些大型用户签订特殊合同，目的是通过较低的电价来换取高负荷时对这些用户进行限电的权利。这种做法，有时被称作可间断性服务，能够促使大型用户采取一些办法，在发生某种原因的欠电压或该区域整体电压下降时可以关停自己的电源。这些公司可以获得电网公司很优惠的电价作为回报。

1.11.3　备用电源

一些用户，例如医院、关键城市服务部门、公共安全机构，均需要备用电源作为电网供电的补充。例如，医院可能会采用能满足 75% 负荷用电的柴油发电机作为后备电源，为照明及关键诊疗设备提高应急电源。一些大型工业用户会为一些重要的工作提供备用电源，例如熔钢浇注、食品加工等一旦开始就不允许中断的工序。当备用电源系统与风电系统相连时，为了便于维护和完成其他工作，需要一个能够实现两个系统切换和相互隔离的开关。

不间断电源设备是一种装配有一块或多块电池以及能将直流电能变换为交流电能的逆变器的供电电源。不间断电源设备由交流电压供电，将交流电能变换为直流电能后为电池充电，同时也能将直流电能进一步变换为 60Hz 的交流电。有些不间断电源设备允许交流电压旁路电源而直接为负荷供电，其中只采用了一小部分电能为电池充电。在电网失电时，一个电子开关能迅速动作将备用电源接入，以保证负荷感受不到电源的变化。备用电源中的电池容量的大小决定了备用电源工作时间的长短。大部分场合下，不间断电源设备是用来为供电中断提供紧急和瞬时备用，然后由一个可长时间工作的后备电源如柴油发电机投入工作，为负荷提供足够持久的供电（假设燃料足够的话）。不间断电源设备一般用于计算机、电话、报警装置以及其他关键设备的供电。

1.12　民用负荷

美国的民用负荷包括一些居民家用的大功率负荷和持续性负荷。大功率负荷包

括空调器、电热器和热吹风、洗衣机、衣物干燥器和微波炉等，持续性负荷则包括灯具、冰箱以及其他一些需要持续一天甚至一年的长时间工作的负荷。空调器和电热器等负荷属于季节性负荷，只在一年的特定时间内工作。洗衣机、衣物干燥器和电热炉具属于在一周不同日子里周期性使用的电器。所有的这些用电设备都属于民用负荷。由一个城市或郊区的千万个家庭构成的民用负荷，会达到甚至超过工业负荷和商业负荷的规模。

由于一个地区内的多数用户会在同时打开灯具照明，而在夜晚需要休息的时候会近似同时关闭照明，因此民用负荷也会按照时区以“滚动特性”的方式跨越整个美国。在第二天这种负荷的时空特性将会又一次重复。随着一个地区住宅建设的推进，民用负荷就会增长。

1.13 电网系统

这里的“电网”是指美国和北美的整个电力输送与分配系统。当一台风力机需要为电网提供电能时，必须在某个地方接入目前的电网，并且需要满足区域电网的特定要求。跨越美国配送电能的电网由大量电力线路构成，这些线路负责将电能从电源输送至负荷。发电机输出电压一般少于5000V，需要通过升压变压器升压至适合输送的更高电压等级，例如用于短距离输电的345kV，长距离输电的500kV，甚至适用于更长距离输电需要的高达765kV的电压等级。当电能被输送到用户侧，通过一个变电站将电压降低为能够使用的水平。图1-11显示了一个包括发电厂、输电线路和用户的完整电力系统。

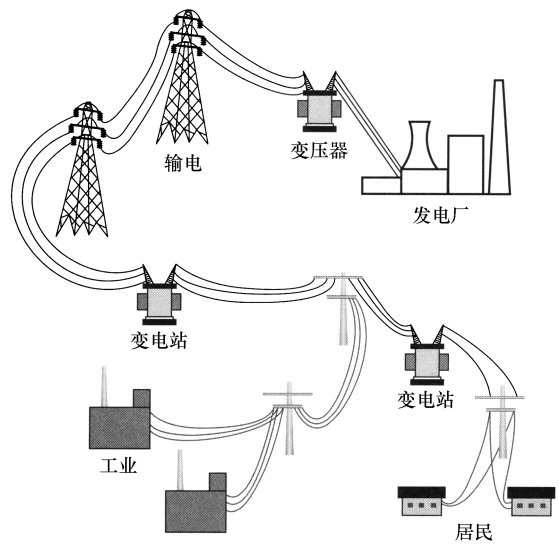


图1-11 从发电厂到用户的电能输送与分配系统

图1-12按照州区地图表示了美国电网的组成。美国电网被划分为三大部分：东部互联电网、西部互联电网和德克萨斯州互联电网。东部互联电网包括东北区电力协调委员会（NPCC），地区范围有缅因州、佛蒙特州、新罕布什尔州、纽约州、马萨诸塞州和罗得岛州；东部中区可靠性协调组织（ECAR），地区范围包括密歇根州、印第安纳州、俄亥俄州、西弗吉尼亚州和肯塔基州；佛罗里达系统协调委员会（FRCC），地区范围包括佛罗里达州；中部美国互联电力系统（MAIN），地区范围包括威斯康星州和伊利诺

伊州；中部大陆地区联合电力系统（MAPP），包括达科他州、内布拉斯加州和爱荷华州；西南联合电力系统（SPP），包括内布拉斯加州、堪萨斯州和俄克拉荷马州。

德克萨斯州电力可靠性协会（ERCOT）包括德克萨斯州的大部分地区，西部系统协调委员会（WSCC）包括新墨西哥州、科罗拉多州、怀俄明州和蒙大拿州等美国西部各州。ERCOT 已经更名为德州地区实体（TRE）。

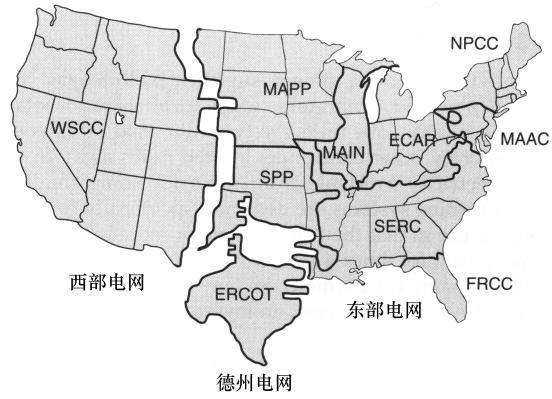


图 1-12　美国的电力系统（图片来源：北美电力可靠性公司）

表 1-8 给出了 2009—2010 年度的美国电力供应、电力负荷以及容量裕度。可以看出，东部互联电网的容量裕度为 33.5%，德克萨斯州互联电网，即现在的德州地区实体的容量裕度为 39%，西部互联电网为 32.3%。美国的整体平均容量裕度为 30.4%。

表 1-8　2009—2010 年度美国的电力负荷、实际或计划发电量以及容量裕度

	东部电网	德州地区实体（TRE），原德克萨斯州互联电网（ERCOT）	西部电网	总计
负荷/MW	476057	46068	113504	635629
电力供应/MW	684015	80424	170745	935184
容量裕度（%）	33.5	39	32.3	30.4

注：表中数据来源于美国能源部能源信息机构。

美国电网为图 1-12 中的所有地区供电，如果一台风力机需要并网发电，就必须确定风力机应该并入哪部分电网，并且要熟知该电网的并网规范。这部分内容将在本书第 8 章有更详细的介绍。

1.14　偏远地区的独立电源

常作为偏远地区电源的独立式发电装置包括燃气轮机、柴油发电机、风力发电机与光伏电池板。独立式发电装置一般用于距离公共电网较远的农场或其他负荷。一些配置一块或多块蓄电池的小型风力机专门被设计用于这些场合，因为蓄电池可以在风力机不运转的时候为负荷供电。为偏远地区供电的电源可以提供直流或交流

电能，如果需要交流电能，则还需要一台能将直流电变换为交流电的逆变器。

有些单位也采用光伏发电系统作为风力发电机的补充，光伏发电系统只要在有光照的情况下就可以发电。当风力匮乏，风力机不能工作时，它可为其提供备用，为蓄电池充电。

1.15 风能的环境和生态评估

在进行风电系统规划时，首先需要进行环境与生态评估。环境方面的问题是指安装风力机给一个地区带来的消极影响和破坏作用。有些情况下，在风力机安装之前需要增强本地的交通条件和基础设施。环境影响也包括安装风力机给某地区带来的某种变化。

近来，风力机叶片对鸟类和蝙蝠造成伤害的问题已经出现。风力机叶片在旋转时，由于其尺寸很大，阻挡了很多鸟类飞行路线。风力机也会产生不可容忍的噪声，这是叶片顶部以非常高的速度划过空气时产生的。新型的叶片经过优化设计，噪声水平显著降低。一些类型风力机，如垂直轴风力机，比水平轴风力机更为安静。

当风力机距离居民居住区很近的时候，噪声就成为一个问题。正是由于这个原因，一些大型风场都位于距离城市很远，具有充足风力资源的地方。有些风场位于荒野之地，而有些则位于噪声影响很小的海上。

一些州及自治市要求在安装风力机之前首先完成噪声、环境及生态评估。一些地区严格限制风力机的采用，然而另一些地区则要求只限制在一个特定区域内安装风力机。一些地方，如机场附近，也需对高高耸立的风力机进行严格限制，因为这会对飞机起飞与降落造成威胁。

1.16 绿色能源技术的必要性

绿色技术泛指能将污染物排放降低到最低程度的各类技术。现代化的绿色能源技术包括风能、太阳能、生物燃料、地热资源及其他相关技术。美国的大部分能源都已过度地依赖进口，火力发电造成的空气污染及碳排放越来越引起关注。基于这个原因，并且考虑到石油及其他当前主流能源均不可以再生，因此风能、太阳能及其他可再生能源的开发利用越来越多。

风能与太阳能发出的电并非完全无成本的。如果仅仅考虑相比于煤炭、核燃料、天然气与石油等一次能源，风电是没有成本的，但大部分风力机均有安装、维护带来的成本问题。如果要发出与当前火电厂同样多的电能，需要大量的超大容量风力机。如果安装如此数量的风力机的话，每一台都需要一笔巨大的周期性检查和维护费用，而且部分甚至全部工作需要在空中完成。

即使风力发电所需的一次能源是免费的，但现在最高效率的风力机发出的每千瓦时电的成本大概是煤电成本的 4 ~ 4. 5 倍，大约是核电的 2. 5 倍。

发电成本的比较有很多方法，但是必须考虑如下因素：由开采地到目的地的煤炭的长途运输成本、核燃料高额的安全防护成本以及核废料的长期处理成本。如果常规能源需要征收新的税费或者排污税的话，必须考虑这些因素。

即使目前开发成本较高，但将来以风能和太阳能为代表的可再生能源将是常规能源的良好补充能源，因为随着装机量的不断提高，技术不断创新和提高。虽然目前风能、太阳能等可再生能源还不足以满足人类能源消耗的需求，但对环境影响较小的可再生能源应该得到最大程度的开发。

1. 17　风能的发展趋势

通过大量安装中、大容量风力机来快速提高总装机容量是美国风电发展的一个趋势。这需要政府采取一些激励措施，如提高风电补贴、降低税费、规范规划与认证流程。政府应该为风能、太阳能等替代能源提供更多的激励资金。

如果石油及其他能源价格继续攀升，或者由于税费导致的最终价格上升，风力发电在总装机容量中所占比例将会逐渐提高，发电量将不断增加。不久之后，高达 6 ~ 7MW 的更大容量的风力机将会被开发与安装。这些大容量风电机组连同大型风场，将达到小型火电厂的规模。

风电发展的另一个需要注意的问题是具备安装、诊断、维修和周期巡检技能的员工的培养。一些技术人员是通过交叉培养得到，而另外一些可能需要通过技能竞赛等方式培养。有的员工负责现场安装工作，而另一些可能负责制造风力机叶片、塔架和发电机。

1. 18　风能的政策走向

风电的政策走向包括税收抵免、矿物能源及其他能源开发限制法规等方面。联邦、州和地方各级政府将继续颁布促进风电与常规火电、核电及其他发电方式协调发展的法律与法规。

关于提高空气质量的法规会限制煤炭及其他矿物能源的利用，鼓励开发更多的风电。联邦、州和地方各级政府也通过为风电创建人为定价机制来改变其成本因素，目的是使风电具备与煤电、采用其他矿物能源及核燃料的电源相竞争的能力。同样，各级政府也会建立提高风电投资回报与利润的相关机制与制度。

联邦、州和地方各级政府也会为风力机的安装、维护与维修提供减税优惠、补助与贷款。联邦政府正在为更新、扩展智能电网大笔投入资金，智能电网技术的研

究和发展，加上大量的投资，将会大大促进智能电网的扩展与风电的接入，提高风电并网的发电量。

1.19 财政扶持和投资回报

风能投资的收益取决于几个因素。投资回报（ROI）是将资金投入某个项目后获得的货币收益或其他回报。例如，对于一个建设与启动投资为 100000 美元的风电场来说，投资者通过一定时间内风力发电机发出的电能而获得的资金收入就是 ROI。ROI 必须足够高以使得投资者在风电项目投资中获益。投资一个项目的个人或公司需要计算收益大小和赢回投资所需要的年限。决定风电 ROI 的因素包括风力机捕获风能并转换为电能的性能以及风力资源大小。风力机效率越高，风持续时间越长，投资收益越高。一般情况下，具有大尺寸叶片和较大扫掠面积的风力机会比较小风力机的投资收益高。影响 ROI 的另一个因素是风力机系统的自身价格与安装成本。政府可以通过降低初始规划成本和安装成本来全力推动风力机的安装，从而提高 ROI。如果政府提供补贴和担保贷款，这将会减少风电初期投资。如果这样的贷款具有较低的费率，则会进一步提高 ROI。

一些类型风力机会比其他类型风力机具有更高的发电量。例如，当将风力机安装于风力资源更为丰富的海上时，风力更为强劲，风持续时间更长，风力机会运行在最高负荷状态。当风力和持续时间均增加时，ROI 必然更高。

另外一种提高 ROI 的方法是建设聚集大量风力机的风电场。当大量风力机相互靠近并集中安装时，由于变电站、并网点、数据采集系统和其他技术可以共用，风力机的安装成本就会有所下降。

公司、农场业主或其他土地所有人可以采用很多方法从风电中获取盈利，例如，可以与打算在其土地上安装风力机并付出相应费用的能源公司签订合同。这些土地被选择的原因是因为它们具有充足的风力资源，风能公司没有土地拥有权，它要么彻底地购买下该土地，要么通过某种酬谢方式从土地所有人处租借土地。这可以通过在一定时期内固定付款的方式实现，也可以在合同里明确规定特殊时期费用可能会提高。这种柔性条款的优势是可以保证土地所有人的稳定收入，并且有助于能源公司预测成本。

另外一个从风能公司得到回报的方法是签订合同，让风能公司根据发电收入的一定比例或税收支付费用。这种合同要求双方均能够访问发电量及其他成本数据，但是一个问题是由于风力的变化，发电获得的收入可能每个月都会不同。一个类似的方法是将固定费用与按收入比例计算两种方式结合。还有一种方法是采用权益资产合作的方式，土地所有人可将全部或部分土地卖给风能公司，收益按照土地拥有比例分配。

1.20　绿色能源投资回报期的计算

对于打算安装一台风力机或者建设包括多台风力机的风场来说，最重要的一件事是确定所获得的收入何时能够付清投资成本，并且开始盈利。对风力机发电收入能够付清初始投资所需时间的计算，称为回报期计算。回报期计算包括两部分，一部分是位于方程一侧的所有成本要素，另一部分是另一侧的收入要素。表 1-9 列出了计算风电成本与收入的所有要素。例如，成本要素包括选址成本、环境影响评估与检测许可文件、风力机运输成本（可能包括海外运输）、风力机塔架、叶片安装成本、启动成本（包括启动调整）、通过变电站和变压器连接电网的并网成本、数据采集与监控（SCADA）系统安装成本（包括风力机和发电机输出监控软件）。其他成本还有年度检查、周期性维护以及电气及机械设备运行寿命内的大、小维修预算。对于大型系统或者整个风电场，还必须要考虑现场维护人员的薪金分担问题。

表 1-9　风力机成本与收入计算的因素

成本要素	收入要素
选址	每天、每周、每月的风力机发电量
许可证	被风电替代的电量
环境评估	被风电替代的电能价格
检测	电网公司对风电的收购价格
从厂家到现场的运输	风力机效率与叶片尺寸
风力机成本	风力机的位置，每年的满负荷风速时间
塔架安装	补贴与税收抵免
风力机叶片安装	基于税收增加的折旧费
电气装置与并网	可再生能源贷款
变压器与变电站	
年检	
周期性维护	
计划小检修	
计划大检修	
人员工资	

回报期计算的收入要素包括风力机每天、每周、每月的发电量估算，在一个独立供电系统中可通过风力机供电的负荷数量。为了估算风力机发电量，需要首先知道叶片扫掠面积和风力机安装地点的风速（很多在线网站上均有相应的计算公式）。接下来就是计算出被风电替代电量的总价值，并根据电网公司的结算成本因素来计算为这部分发电量应付的费用，其中包括由于功率因数越限或高峰期超负荷用电造成的罚款费用。居民用户、工业用户和商业用户的电价费率是不同的。一旦计算完收入与成本，就可以对一台为家庭、商业或工业用户供电的风力机的投资回报时间进行确定。

对于将电能出售给电网的并网系统，需要计算一段时间内风力机的发电量，由于电能由电网公司回购，还需要确定电网公司的“回购电价”。需要说明的是，电网公司从风电收购电能的电价比它向用户售电电价低得多。基于这个原因，有些大型风场就像一个小型电力公司一样直接把电卖给用户，而非电网公司。

可用在线计算程序或者单机计算机程序计算上述各种要素的具体数值。这些计算程序都会考虑或多或少的要素，并且各要素的权重也不一样。一些制造和安装风力机的公司能够提供精度很高的计算程序，因为它们具有长时间安装、运行风力机的历史经验。

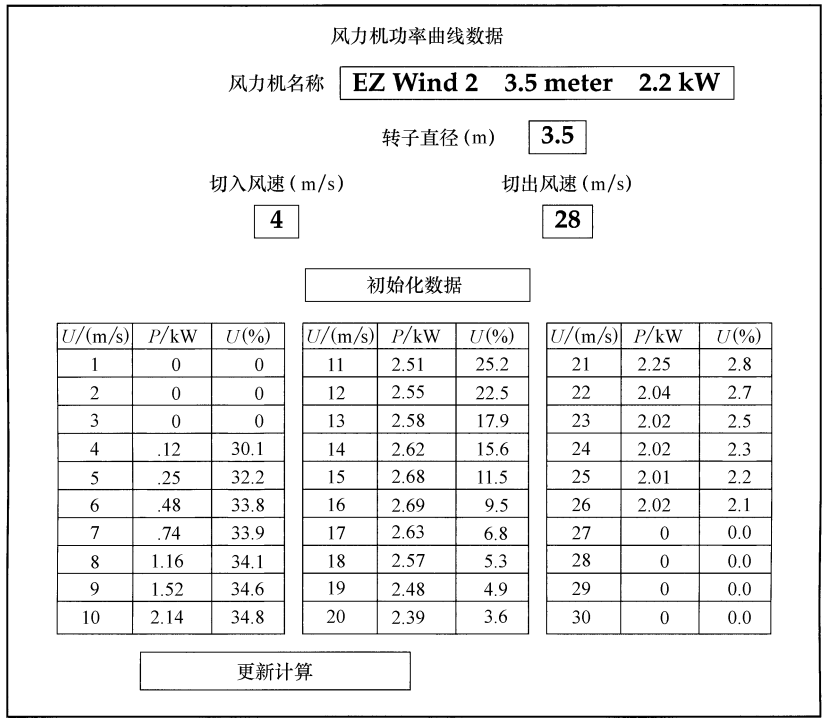
在线网址http://www.wind-power-program.com/index.htm采用表1-10所列信息进行回报期计算。图1-13是计算程序的屏幕界面以及需要输入的表格信息。为了为计算程序提供准确数据，下列信息是必需的：风力机风轮直径；切入风速，即对应风力机开始工作的最小风速；切出风速，即风力机需要退出运行的风速；在切入风速与切出风速之间正常运行时的功率输出特性。这些信息可以手动输入程序，也可以采用典型的模型数据。计算程序将采用给定风力机的最高效率来计算，小型风力机的最高效率为25%～35%，而大型风力机的效率则为40%～50%。程序中采用的速度单位为m/s。

表1-10 计算风力机投资回报周期所需要的数据

输入数据	说　明
作为平均风速和风速变化大小的函数的平均输出功率	来源于制造商数据
作为平均风速与风力机寿命函数的每千瓦时电成本估计值	按照风力机输出功率的计算和风力机安装地点进行
作为平均风速与参考电价的函数的回报周期估计值	需要知道所替换电能的电价,或者并网时收购价
显示风力机不同功率输出时间比例的功率曲线,包括空载情况	借助于一天内风力机在不同风速下运行时间的计算

当风力机效率确定以后，就可以计算风力机的发电量。根据风力机每天运行的时间以及风力机安装地点当天的平均风速，就可以计算出每天的发电量。这部分计算所需的信息必须尽可能准确，以获得最终的准确结果。这些信息与风力机安装位置和每台风力机的高度有关，可能需要按照一天、一周或一个月对其进行平均值计算，而且按照安装地点进行逐月调整。其中一些数据可以通过之前安装在本地点的另一台风力机的SCADA系统提供的数据得到，当某地区或风场需要安装其他风力机时，这种方法非常有效。

一旦确定下来风力机的效率，就可计算出一年内风力机的运行时间和发电量。回报期计算的下一步是确定替代其他能源的风电价格，或者当风电并网时电网的购电价格，这取决于不同的地区电价、国家法律和风电法规，差异较大。这些参数确定后总的价值就会算出，投资回报周期也就能确定。



U/(m/s)	P/kW	U(%)	U/(m/s)	P/kW	U(%)	U/(m/s)	P/kW	U(%)
1	0	0	11	2.51	25.2	21	2.25	2.8
2	0	0	12	2.55	22.5	22	2.04	2.7
3	0	0	13	2.58	17.9	23	2.02	2.5
4	.12	30.1	14	2.62	15.6	24	2.02	2.3
5	.25	32.2	15	2.68	11.5	25	2.01	2.2
6	.48	33.8	16	2.69	9.5	26	2.02	2.1
7	.74	33.9	17	2.63	6.8	27	0	0.0
8	1.16	34.1	18	2.57	5.3	28	0	0.0
9	1.52	34.6	19	2.48	4.9	29	0	0.0
10	2.14	34.8	20	2.39	3.6	30	0	0.0

图 1-13　风力机功率曲线计算程序

风速（U）单位为 m/s，功率（P）单位为 kW，每种速度下的效率（U）采用百分数（%）

1.21　风能的税赋考虑

经济激励可以通过税赋减免计划的形式实现，如所得税激励、企业税收激励、房地产税收激励和销售税激励等。税收激励包括联邦政府和州政府的税收激励、贷款及其他有助于补偿风力机建设投资的措施，目的是加速风电的建设与发展。有些激励计划是针对业主或私用风电项目，而有些是针对建设、运营大型并网风电项目的公司，表 1-11 列出了其中一些计划内容。该表是从可再生能源数据库（DSIRE）中复制出来的，DSIRE 是由北卡罗来纳太阳能中心和州际可再生能源理事会（IREC）在 1995 年启动的一个持续性项目。该表只是列举了几个联邦计划项目的例子，读者可以自由查询联邦政府支持的最新计划项目。需要指明的是，很多计划项目都存在一定的限制条件，并且只在规定的时效期内有效。读者可以随时登录 DSIRE 网站查询最新的激励项目。

当前的联邦计划包括有：企业税收减免、企业税收折旧补贴、企业免税、企业税抵免、资助项目、贷款项目、工业招聘支持、个人税收抵免和生产激励。

表 1-11 联邦对于可再生能源的激励及政策

财政激励	计划项目名称
企业税收减免	高效型商业建筑税赋减免
企业税收折旧补贴	修订的加速成本回收机制(MACRS) + 红利折旧(2008 – 2009 年度)
企业免税	民用节能补贴免除(企业)
企业税抵免	商业能源投资税收抵免(ITC) 可再生能源发电税收抵免(PTC)
联邦资助项目	财政部可再生能源资助 农业部美国农村能源计划(REAP)资助
联邦贷款项目	清洁可再生能源债券(CREB) 能源部贷款保障计划 农业部美国农村能源计划(REAP)贷款保障
工业招聘支持	先进能源项目投资税赋抵免资格认证(个人)
个人税收抵免	民用节能税赋抵免 民用可再生能源税赋抵免
生产激励	可再生能源生产激励

注：表中数据来源于再生能源数据库（DSIRE），由北卡罗来纳太阳能中心和州际可再生能源理事会（IREC）在 1995 年启动的一个持续性项目。

当前民用系统的联邦税收激励是其安装成本的 30%，最多不超过 4000 美元。商业系统为支出额的 30%，对 2008 年 12 月 31 日以后投入运行的小型风力机没有最大限额的约束。满足条件的小型风力机是指容量小于 100kW 的机组。(总体上，在 2008 年 10 月 3 日 ~2009 年 1 月 1 日之间的满足条件的项目的最大限额是 4000 美元。2009 年美国“恢复与再投资法案”取消了对小型风力机的 4000 美元的最大限制。)

1.21.1 美国其他的投资税费抵免

2005 年，国会创建了联邦能源政策法案（2005），其中包括了一项针对光伏系统、太阳能热水系统和燃料电池等民用能源的税赋抵免计划。2008 年 1 月，H. R. 1424 将税赋抵免的范围扩大到小型风力机系统。该计划时效期可至 2016 年 12 月 31 日，但是它必须应用于替代最低税额，因此一些低收入的业主可能并不满足条件。

总起来说，纳税人可为他们在美国国内常住住所内的能源装备申请其价值 30% 的税务抵扣。当设备安装完毕可以发电且住宅已经入住后，就可以算出设备的花费。花费包括现场准备工作、风力机装配与安装、连接风力机与家用电气系统的管道与线路。如果联邦税收抵扣超过了纳税人的税金，余额可以转入下一个纳税年度。最大允许的抵扣额度随着技术和设备不同而不同。容量小于或等于 100kW 的小型风力机所有人可得到系统安装成本 30% 的抵扣，但不超过 4000 美元，该优惠

政策持续到 2016 年 12 月 31 日。对于家用风力机，抵扣额限制于 4000 美元和每千瓦 1000 美元两者之间的较低者。

另外一个联邦计划是投资税收抵免（ITC），它帮助用户为家庭、农场或生意购置小型风力机。容量小于或等于 100kW 的小型风力机的所有人可以得到其总安装费用 30% 的抵扣。ITC 一开始是作为 2008 年紧急经济稳定法案的一部分创建的，后来在 2009 年美国恢复与再投资法案中对其进行了调整。ITC 适用于 2008 年 10 月 3 日 ~2016 年 12 月 31 日期间安装的设备。

1.21.2　州计划项目举例

很多州实施了税收激励来促进风力机的安装与使用。这些计划是联邦计划的补充，可与联邦税收减免计划一起实施。这就意味着，业主、企业、商业能源公司可以综合利用联邦及州的税收激励措施来降低风力机建设的投资成本。例如，路易斯安那州对在 2008 年 1 月 1 日后为住宅或出租公寓购置、安装的风力机提供税收抵扣。该项抵扣可用于个人、公司或专利税，抵扣数额为包括安装在内的风力机花费中的首笔 25000 美元的 50%。

在俄亥俄州，俄亥俄州发展部（ODOD）的俄亥俄州能源办公室（OEO）为新能源项目提供了一项资助计划，此处的新能源项目指的是用于俄亥俄州内商业、工业、公共机构和政府实体的光伏、风电和太阳能热水系统。该项计划的资助水平为 2 美元/kW·h。该计划还要求在本地区平均风速情况下年发电量至少为 3000kW·h。资助额度的上限是符合资助要求的系统成本的 40%，最高金额为 200000 美元。俄亥俄州也有一个民用资助计划，通过民用风能激励（NOFA 09-02）可为民用系统提供高达 25000 美元的资助。俄亥俄州计划的一个特点是来源于先进能源基金项目，该项目由本州内投资者所有的电力公司的客户电费管理部门资助，这些电力公司包括美国电力公司（AEP）、杜克能源（以前的 CINergy）、代顿电力与照明以及第一能源公司。

1.21.3　查看最新计划

在计划安装风力机之前，查看地区、州和联邦的激励计划是非常重要的。当地区、州、联邦颁布新法规的时候，这些计划几乎每个月都发生变化。可通过联邦、州和地区政府网站查看激励计划的最新信息，也可以联系调控风电激励方法的能源办公室来获得信息。

一些电力公司也能提供关于税收激励和贷款计划的最新信息。一些风力机制造商和风能公司对给定时间内的税收激励和贷款计划信息也比较熟悉。

1.22　绿色技术岗位的技能需求

风能工业需要大量的电气技术人员和机械技术人员来装配、安装、诊断和维护各种容量和类型的风力机。风能工业也需要大量的建筑师、设计人员以及能确定单

台风力机或风场内多台风力机安装位置的规划师。

制造各种塔架的五金工厂以及制造发电机、可编程序控制器（PLC）、控制板、偏航电动机、系统电气部分切换开关等设备的电气电子公司也都需要大量的技术人员。齿轮箱中的齿轮、传动链的制造以及所有液压泵、阀、气缸的加工均需要机械师。

风力机安装之前的现场准备工作包括很多内容，包括从修路到固定塔筒的深基坑的凿挖过程中的所有工作，例如在混凝土基础上挖洞，在混凝土中安装用于敷设连接风力机的地下线路的管道。

其他的工作还有塔架的竖立、机舱、叶片和发电机的塔上安装。对于小型机组完成这样的工作需要借助于中大型的起重机。在大型机组中，机舱和叶片是由直升机吊装上去的。对于海上风力机，需要能够胜任水面工作、能安装将海上风电输送到岸上的海底电缆的技术人员。

当大量风力机被安装在一个风场时，需要一个完备的典型电力系统。电力系统包括大量的变压器和承载远距离高压线的电力塔杆。制造变压器、电力塔杆、高压电缆以及安装变压器和电力塔杆的公司，都会提供越来越多的工作机会。

当风力机运行一定时间后，就会需要进行周期性维护工作。要想胜任这项工作，就必须能够爬上风力机塔架，在桨叶、转子、齿轮箱或传动链、传动轴和联轴器、发电机上工作。每一个这样的部件都必须进行周期检测和润滑。有时还要进行振动分析，调整传动轴和联轴器。

在一些情况下，技术人员需要一些机械和装配技能来更换叶片、转子、齿轮箱、传动轴或发电机。在大修情况下，如果所有的上述部件作为一个系统进行整体替换，则工作可能会在地面上比较完备的设施条件下完成。在另外一些只需更换个别部件情况下，这些工作将会在塔架上或空中完成。彻底性检修需要更换风力机的主要部件，可以为风力机增加 15 ~ 20 年的服役期限，这比更换整台风力机的成本要低。大修和周期性检修均需要技术人员参与，这些技术人员可能被安排去特定的现场，或者根据合同约定从一个现场到另一个现场，因为如果在一个现场的话一年可能只能有几个星期的工作量。

1.23 风能产业的工作岗位

在不久的将来，将会需要大量的熟练技师和其他专业人士来满足风能产业发展的要求。有人预计本行业将会提供一百万个新的工作岗位。风能技术工业领域内的工作被称为“绿领工作”。这些工作需要施工经理、风力机运行与维护主管、风能工程师、高级机械和电气工程师和环境工程师。

1.23.1 规划与销售工作

风能领域可以提供的一类工作是规划、销售工作。规划师应该有环境科学方面的教育培训背景，必须能够懂得风能可利用性、风能选址、风电并网等内容。销售

专员需要接触对风能技术感兴趣的客户。

1.23.2　风能领域工作的教育要求

一些风能领域内的工作仅仅需要中学文凭或职业学校证书，这属于最低水平的工作。很多工作则要求具备社会机构或技术学校的电气或机械技术、自动化、计算机辅助绘图/设计、架构或项目管理专业学位。一些工作可能需要某些领域内的工程或工程技术学士学位，一些工作也需要硕士甚至博士学位。

1.23.3　教师和技术教练

随着风能技术领域对经过培训的技师和员工需要数量的不断增加，对该领域的教师与培训师的需求也不断增长。从事风力机生产与维护的公司需要技术培训师资来为这些大型设备的运行与维护提供正确的指导与培训。社会机构、技术学校甚至大学都需要能够有能力从事这项教育培训工作的技术人员。

1.23.4　现场服务技术人员

现场服务技术人员受雇于制造或安装风力机的公司，也可以是受雇于专业从事风力机维修的公司。现场服务技术人员一般是全年无休、一天 24 小时待命，这样可以在风力机设备出现问题时迅速赶到现场。现场服务技术人员既要有维修电气设备与发电系统所需的电气专业技能，也要有维修包括叶片、转子、传动轴和齿轮箱在内的风力机传动系统所需的机械专业技能。他们也需要具有在风力机塔上工作的能力，必须能够爬上塔架并可以在 200ft 的高空进行工作。这些技术人员的专业技能可能还包括能够诊断及维修液压系统及其零件、PLC、逆变器及其他风力机监控系统内部的电子系统。

当风力机出现问题时将停止运行，此时现场服务技术人员将被安排到现场来对整个系统进行诊断，不但需要能够迅速辨析问题的症状，更要能迅速找出根源。现场服务技术人员也可能承担风力机的常规维护工作。

1.23.5　项目经理与建筑工作

当一个风电项目在设计、实施和安装时，需要技术人员完成项目的设计与实施工作，包括规范研究、许可证要求的满足以及整个安装过程的管理。这些技能类似于建筑项目的管理工作，但是要做好风电建设项目的管理工作，还必须深入掌握风力机的特殊需求。当作为大型风场一部分的大量风力机安装在同一地点时，项目管理所需要的技能就更加复杂。

项目经理必须对现场选址、地基建设、塔架及其他风力机设备的安装、接入电网等工作非常熟悉。虽然项目经理在这些不同的工作领域最终要依靠专家，但他的经验和能力能保证项目按照计划进行并完成预定目标。这类项目对建筑技术的需求与其他大型建设项目类似，但需要额外考虑到风力机的一些特性需求。

1.23.6　风力机装配技术人员

今后十年，风力机的安装数量将会达到当前的两倍。美国及海外更多的公司将从事风力机的制造与装配。作为其中的一项重要工作，风力机装配是将所有零部件

装配到一起形成一台可运行的完整风力机。在装配中，装配技术人员需要阅读并解释设计图样，按照工序要求装配风力机中的机械、电气部件。其中包括装配机舱中的所有零件，包括转子、低速轴、齿轮箱、高速轴和发电机。所有零部件安装完成后，为了进行最后的调整，它们将被放置到测试平台上并在测试条件下运行。最后完成的装配还要进行传动链的同轴测试、振动测试以及运转发电测试。如果风力机采用了逆变器，还要将逆变器连接到机组上进行测试，以确保逆变器输出 60Hz 的工频电压。

风力机装配过程中的另外一项工作是质量控制，以保证正确的工作流程与工序，并且确保风力机性能的实现。质量控制技术人员的任务是保证每台离开装配线的风力机都能够正常安装与无故障运行。

1.23.7 风力机叶片技术人员

随着美国及海外对风力机需求量的不断提高，很多公司开始生产风力机叶片及其他零件。现代化风力机的叶片是由加强纤维型环氧树脂（玻璃纤维、或者其他碳复合材料和塑料件）制成的。将这些原料制造成对称的风力机叶片，需要用到一些制造玻璃纤维船和其他玻璃纤维制品的相关技术。包括机舱盖在内的其他一些风力机零部件，也采用玻璃纤维或者其他碳复合材料制造，目的是获得最轻的质量和最大的强度。制造叶片的另外一项必要工作是金属模具的设计与铸造，这些模具用来在叶片制造过程增加压力，使生产出的叶片具有能承受强风和巨大应力所需的强度。

1.23.8 电工及输电技术人员

当在一个风场中安装单台或大量风力机的时候，风场输出将被连接到电网，这类似于将煤电、核电、水电或燃气发电机组并入电网的过程。如果风电场发出的大量电能需要输出至电网，就需要额外的电力杆和输电塔，同时也需要用来将电能变换至合适电压等级的一定数量的新式变压器与变电站。电工及输电技术人员的工作就是确保风电场电能送出系统满足输电公司的要求。

一些风电场的电能是通过地下高压设施输送到电网的。地下电缆的安装需要预埋地下大型导管（塑料管路），然后通过导管敷设电力电缆。现代化施工过程采用了钻孔/凿洞机械设备来安放地下导管。钻孔/凿洞机械设备采用了一种安装在钻杆前段的钻头，当在地下 3～10ft 深度的地方钻土推进时，该钻头能在机械控制下保证准确的钻凿位置。当钻头工作时，位于钻头后方的一个具有高灵敏性的探测系统可以保证将钻头的钻凿路径误差限制在几英寸的范围之内。在凿进的过程中，钻杆通过增加 8～10ft 节段不断增加长度，直到整个工作完成。当钻头行进到目标地点预先挖好的一个纵深洞穴的时候，作为导管的塑料管将被连接到钻尾。以盘卷方式存放的塑料导管就会在钻头被拉回到钻孔设备过程中被逐渐展开。当整个工作完成后，导管两端都需要伸出各自端部洞穴外 3～6ft。接下来，技术人员就会用到一条在安放导管时已嵌入其内部的拉引缆，将其与电力电缆系在一起，通过牵拉穿过整

个地下导管。电力电缆一端安装在风力机内部的配电柜上，另一端安装在电网或其他终端的开关设备上。

1.23.9　机身装配及塔架安装人员

风力机安装的另外一项工作是塔架的竖立和塔架顶端的机舱安装。这些工作需要一些所谓的操作和安装技巧。机身装配包括将线缆和提升吊索接到塔架和/或机舱上，以便于将其安全地提升并安装在最终位置上。提升线缆和吊索安装在用于吊装的起重机上，起重机吨位和高度要求比较高：吨位必须满足塔架重量要求，高度也必须满足安全操作要求。机身装配还需要能够准确地移动风力机零件，即使处于高空也是如此。

1.23.10　如何寻找风能领域的工作岗位

寻找风能领域工作岗位的最好方式是登录相关网站，可以登录需要岗位招聘的风力机制造、安装公司主页寻找机会。一些想招聘风能领域工作人员的公司会举办招聘会，或其他能够直接招聘到高级技术人员的招募活动。

简　答　题

1. 说出水平轴风力机的六个基本组成部分。
2. 解释什么是机舱，其内部包括哪些风力机部件。
3. 请解释为何发电机恒速运行的风力机及发电机变速运行的风力机都可以输出 60Hz 的电能。
4. 请列出 19 世纪 70 年代促进美国风电发展的主要事件。
5. 指出风力机的两大主要类别。
6. 分析达里厄型和萨沃纽斯型垂直轴风力机的主要区别。
7. 分析将风电作为唯一电力能源的限制因素。
8. 说明熟悉民用负荷、商业负荷和工业负荷在学习风电中的重要性。
9. 列举出为风能提供资助的四个联邦或州级的资助计划。
10. 说明风力机投资回报周期计算中需要考虑的因素。

选　择　题

1. 上风向式和下风向式水平轴风力机之间的区别是（　　）。

a. 下风向式风力机中，风首先掠过机舱，然后吹向叶片；上风向式水平轴风力机中，风先掠过叶片，然后吹向机舱

b. 上风向式风力机中，风首先掠过机舱，然后吹向叶片；下风向式水平轴风力机中，风先掠过叶片，然后吹向机舱

c. 上风向式水平轴风力机安装在建筑的上游风向；下风向式水平轴风力机安

装在建筑的下游风向

2. 2009—2010 年度，美国三大电网的电力总供应为㊀（　　）。

a. 669MW

b. 935MW

c. 15. 6MW

3. 欠电压是指（　　）。

a. 全部电力系统退出的情况

b. 发电量超过用电量的情况

c. 电网电压低于其额定值 8% ~12% 的情况

4. 调峰机组是（　　）。

a. 能在临时通知情况下迅速起动并向电网发出大量电能的发电机

b. 水力发电机

c. 当电力负荷过高或过低时能持续运行的发电机

5. 下列那些属于风力机基本参数？（　　）

a. 发电机输出功率

b. 叶片长度

c. 塔架高度

d. 以上全部内容

6. 2008 年美国的电力消费需求（　　）。

a. 比 2006 年高

b. 比 2006 年低

c. 与 2006 年近似相等

7. 2008 年美国各类发电方式按发电量大小的排序为（　　）。

a. 风电、光伏发电、煤电、核电、天然气发电

b. 核电、天然气发电、风电、光伏发电、煤电

c. 煤电、核电、天然气发电、风电、光伏发电

d. 煤电、天然气发电、核电、风电、光伏发电

8. 2009 年各类电力负荷大小排序为（　　）。

a. 民用负荷、商业负荷、工业负荷

b. 工业负荷、商业负荷、民用负荷

c. 工业负荷、民业负荷、商用负荷

d. 民业负荷、工业负荷、商用负荷

9. 下列哪些内容属于风力机投资回报期计算中的成本要素？（　　）

a. 风力机成本

㊀ 原文选项中的单位为兆瓦（MW），应该为吉瓦（GW）。——译者注

b. 选址与许可证申请
c. 塔架、风力机及发电机并网的安装成本
d. 以上全部内容
e. a 与 b

10. 下面哪些是风能产业可以提供的工作岗位？（　　）
a. 规划和销售人员
b. 现场服务技术人员
c. 项目经理与建筑师
d. 电工及输电技术人员
e. 以上全部内容

第 2 章　风能资源与风力机选址

本章学习目标

读完本章后你将能够：

- 了解风的产生原因。
- 认识风向和风速的变化原因。
- 知道风速长期变化的影响因素。
- 认识影响风力机选址的因素。

本章关键词

加速度（Acceleration）
气压（Air pressure）
大气压力（Barometric pressure）
边界层风（Boundary-layer wind）
力（Force）
梯度风（Gradient wind）
陆地微风（Land breeze）
质量（Mass）
气压梯度力（Pressure gradient force）
季风（Prevailing wind）
海风（Sea breeze）
风阻（Wind friction）
风力分布图（Wind map）
风紊流（Wind turbulence）

本章概述

本章主要帮助读者更好地理解风的原理和自然特性，介绍了风的特性以及引起风流动、风向及风速改变的原因，同时针对特定地区的地理特点，分析了风在不同地区表现出不同特性的原因。另外还介绍了影响风速变化的因素，这些变化包括季节性变化、年度性变化、昼夜变化、地理差异引起的变化，例如在山区和沿海地区的差异。

本章介绍了扰动风、阵风、极端风的概念，分析了适合风力机安装的条件以及影响风力机运行的因素。最后讨论了如何预测一个地点的风能资源，以及介绍了风力机选址所需要遵循的原则和注意事项。

2.1　风能的基本物理特性

人们对风的认识已经有很长的历史了。在最近的几百年里，人们通过研究风来改善航海、改良风车。近 50 年，这些研究被应用到风力机上。在认真了解风的物理特性的基础上，科学技术人员对如何提高风力机效率做了深入的研究。

最初，对于风的研究常用来预测天气和风暴，例如日常或长期的天气预报、严

重的雷雨、龙卷风、飓风和暴风雪等。关于风的信息往往与天气的变化密切相关，这些知识可以帮助科技人员更好地了解如何预测风以及如何捕获风能。

科技人员已经能够预测哪些地区会出现强度最大以及持续时间最长的风，这将能够帮助确定风力机合适安装的地点。人们也渐渐了解到了风因昼夜、季节、海洋环境不同而产生的差别。为了正确掌握这些知识，了解一些相关的基本风能术语是很有必要的。下面将介绍一些基本的风能术语。

2.1.1　风能术语

力 F 可被定义为使单位质量物体获得一定加速度时所施加的作用。M 指物体的质量，可以由它的重量来确定。加速度 a 指物体速度的变化率。力 F 可以由公式 $F = ma$ 来确定。物体加速度越大，所需的力越大；同一加速度，物体质量越大，所需的力越大。力的单位为牛顿，用 N 表示，质量的单位是 kg 或磅，加速度单位为米/秒^2（m/s^2）。

将力施加到一个物体上并移动一段距离后，这个力就做了功。例如，推或拉一个 1lb 的物体前进 1ft 时做了 1lbf·ft 的功。可以运用公式 $W = Fd$ 来计算所做的功，W 为所做的功，F 表示力，d 为物体沿力的方向移动的距离。地球万有引力引起的重力垂直向下作用于一个物体，在计算时需要考虑到物体的质量。施加的力越大或者物体的质量越大，所做的功越多。

压强是指单位面积上受到的压力，可用公式 $P = F/A$ 计算，这里 P 为压强，F 为力，A 为面积。当作用力增大或是面积减小时，压强增加。常用的压强单位包括磅力/平方英寸（lbf/in^2）和巴（bar），$1bar \approx 14.5 lbf/in^2$。

风向通常由罗盘的指针指向来确定，可以转换为角度。例如，0°表示北方，90°表示东方，180°表示南方，270°表示西方，360°表示北方。注意到 0°和 360°都表示北方。四个基本方向之间的方向定义为东北（NE），西北（NW），西南（SW），东南（SE）。需要指出的是，“北风”指从北方吹过来的风。

2.1.2　其他的风能术语

风和天气紧密相关，因此这里再介绍一些与天气相关的术语。气压指的是大气施加于地面上的压强。气压用以 in 为单位的汞柱（水银柱）高度来表示，或者用每平方英寸的压力表示。海平面上的压强为 29.92inHg 或 $14.7 lbf/in^2$。以水银柱为单位是因为气压的测量使用的是一个 U 形管压力计，这里的 U 形管是一种形状类似字母 U 的管子，两端开口。当这个管子装上水银，海平面附近的汞柱高度为 29.92in。当你走向更高的山区时，比如丹佛、科罗拉多，那里高度大约 6000ft，大气压强会比较小，约为 $12.1 lbf/in^2$，汞柱高度也会相应的低一些，约为 24.63in。

当暴风雨经过美国时，本地区的大气压强便会减小。在天气预报时，低压或是气压下降往往是暴风雨来临的前兆。在大气压强高时，天气预报往往为天空晴朗的好天气。记录中最低的气压出现在飓风中心，为 25.69inHg 或 $12.5 lbf/in^2$。记录中最高的气压为 32inHg 或大约 $15.6 lbf/in^2$。虽然极高和极低的气压并不常见，但是

每天的气压小幅波动往往是导致风速和风向变化的原因之一。

风向和风速的变化与气压有着直接的关系。沿着一定空间距离，不同地点的气压会存在差异，这叫作气压梯度。天气预报使用气压图来表示高压和低压系统以及气压梯度，从中可以推断出风向和风速。天气预报会关注各个高度的风速及风向。但是风力发电研究人员更关心低空风的流动情况，即距离地面不超过200ft的高度，因为只有这些风才是用来推动风力机叶片做功的。典型的风力机一般安装在大约200ft的高度，但是现在人们也开始研究安装高度在300～500ft的风力机。因为未来的风力机可能需要安装在超过300ft的高度，所以我们要进一步研究更高海拔的风流特性。

高空风的变化会受地球自转影响。在南北半球，地球转动对风的流动所产生的影响并不相同。这意味着吹过美国和加拿大的风不同于吹过澳大利亚和南美大陆的风。

近地风会受到地表形态的影响，例如树木、山脉和建筑物。这些物体降低了风速的同时也使风向产生了微小的变化。不同高度风的特性也有所不同：近地风会受到其与树、建筑物或山脉之间的摩擦力的影响，然而几百英尺高度处的风基本不会受到这样的影响。在美国的中部，例如内布拉斯加州、爱荷华州、明尼苏达州，风可以不衰减地吹过几百公里，因为那里地势平坦。而在其他地方，例如加利福尼亚，山脉起到了阻挡作用，风流只能选择山谷通过。

另一个需要了解的重要知识点是风在低压或高压区不一定以直线前进。例如，在北半球低气压区，风的前部往往会以逆时针的方向穿过此地区。这意味着风开始通过一个地区时先从一个方向吹来，然后逐渐改变它的方向，几小时后又开始向几乎相反的方向吹，直到风的前部离开了这个区域。如果风的前部为高压区，当风移动到该区域内后会以顺时针方向旋转。在北半球的春季，几股流动的风在24h内可能会连续到来，并以很快的速度穿过某区域。对于风力机而言，这就意味着风速和风向会在24h内发生剧烈变化。而在另一些地区，风可能来自相同的方向，并且每天以不变的速率通过。

在研究风能时会遇到其他的术语，例如边界层风、梯度风、气压梯度力。边界层风指的是接近地面的风，处于大气层的最底部。边界层风的特性受与之相接的地面环境的影响较大，甚至在一个小时之内边界风的流动、速率、温度、湿度就会发生变化。边界层风对风力机捕获、转换风能有很大的影响。边界层风的主要影响因素包括不规则地表所产生的摩擦、地表温度变化、夏季和冬季温度变化等。

梯度风指在地表上方风按恒定速度并且平行于弯曲等压线流动的风，地表的不规则物体如山脉、树木、建筑物，所产生的摩擦也会对其流动产生影响。当梯度风吹过高压和低压区前部时，梯度风的风速会发生变化。同样，当地表温度随着昼夜交替或季节变换而变化时，梯度风的风速也会发生变化。

气压梯度力是使空气流动成为风的主要作用力。通常情况下，压强梯度力是从

高压区域指向低压区域，它可以影响天气形势从高压区域移动到低压区域；这种作用或压强差是造成风流动的主要因素。压强差的大小影响了风速，压强差最大时风强度最大。

风阻也是影响风速、风向及其扰动的一个因素。风阻指的是在两层流动方向不同或是流动速度不同的空气之间产生的摩擦。在这两种边界处产生的摩擦是风剪切的结果。风剪切指的是指风向的突然变化。在春天的暴风雨或雷雨天气里，风阻可能会引起风的突然扰动或者风向的改变，这就可能会使风对风力机的作用变得不可预测、不稳定。这种类型的风速或风向的波动也会出现在当天气改变导致的温度迅速发生变化时，尤其是地表开始从冬天寒冷的气温中变化到回暖的春天。例如，在美国的中西部，尤其是在春天，当冷空气前锋快速经过暖空气时，温度可能在在一小时之内发生 20～30 ℉的变化。这种快速的变化会造成强大的雷阵雨、飓风，通常还会伴有风向、风速的剧烈变化。这些因素导致风力机在这种强风环境下很难正常运行，使得效率大幅降低。

2.1.3　海上微风和陆地微风

海风是由海洋和陆地之间的温度差异造成的。在夏季，太阳光照强度较强，太阳辐射同时使陆地和海水升温，但陆地会比海水热得更快，所以白天陆地的温度可能会达到 80～85 ℉，海水则保持在 75 ℉左右。当出现这种情况时，海风就会产生，并且从海上吹向陆地。在晚上，当太阳停止照射地球，陆地就会以与白天加热时一样的速度冷却，但是海水温度则变化较少，因为它不仅加热慢，散热也很慢。当陆地温度下降到和海水温度相同时，海风就会停止或者减小为微风。海风经常在春季和夏季出现，因为陆地升温比要海水更快。

如果陆地冷却充分，它比海水低 5～10 ℉，此时上述过程就会逆转，陆地风就出现了，风从陆地吹向海面。在开阔的远处水面，这种影响会小一些并且风速很弱。陆地风在秋冬季节很普遍，因为此时陆地比海水温度要低。

2.2　风的特性

了解和测量风速在安装风力机和预测可供发电的风量时是十分重要的。风的一个自然现象是高度越高，风速越快。例如，在地面附近的风速约为 5mile/h，而到了 30ft 的高度风速则会达到 20mile/h。这就是现代大型风力机都装在最高达 180ft 高塔上的原因，而且，人们正在对将风力机安装在更高的塔架上的可行性做深入研究。

风是太阳辐射作用的结果，当太阳以不同的强度照射到地球的不同位置时，便引起风的流动。地球转动使得地球任何一面都会接受每天几小时的日照。在赤道附近地区，地球接受太阳照射的时间每天基本一样。在北半球，夏季地球接受的太阳照射要多一些，日照时间大约从 5：00 a. m. 到 9：00 p. m. 。这意味着可得到的风能会更加充足。在冬季，北半球远离太阳，所接受到的日照也会减少。天气快速变

化引起的暴风雨也会为风能提供充足的能量。风的特性依赖于地球旋转和季节更替。本章下一部分将会介绍产生强风或弱风的其他自然因素。

2.2.1 风吹动的原因

当风从一个高的气压点吹动到低的气压点时，两点之间的气压差越大，风的强度越大。现在可以通过测量两个气候锋面的压强差来预测每天风速的大小。风向取决于两个气压系统的位置。这些气压系统每天或每个季节都会改变。决定两点之间特定气压产生的因素一是温度，二是气候锋面的存在。

例如，在春季，地表温度每天都会经历强烈的变化。可能某天一个地区会有3～4in 的降雪，温度为 25～30°F，而第二天一个暖锋面可能从南方带来 50～60°F 的暖空气。这样强烈的温度变化同样会带来强风。

另一个认识风是怎么样吹动的方法是：当外面较冷时打开窗户或门，冷空气将在门窗下方涌入，而暖空气在门窗上方跑出。暖空气上升并且移到冷空气区域，冷空气替代暖空气的位置，快速地移动到地面。在自然界中，风也是按这种方式运动，是由高压和低压区域或者高温和低温区域的差异引起的，而非人为因素可以决定的。人们所能做的是了解稳定的风是从哪里产生，利用这些地点来安装风力机进而发出更多的电能。

2.2.2 盛行风

在美国，盛行风从西海岸吹向东海岸，气候锋面同样按这个方向移动。另外，其他的气候锋面从墨西哥海湾穿过美国南部向东北方向移动。季风对于风力机十分重要，因为这些风更强而且更持久。风力机有时安装在没有强风的地点，因为在这些地点的风持续性更好，可以产生足够的电能。

2.3 与风电系统相关的地理因素

适合用于风力发电的风通常在特定的地理区域。例如，在美国风电场主要建在几个特定地理环境下。其中一个地区是德克萨斯州中部，那里风从平原吹过。适合安装风力机的其他地点包括北部的科罗拉多中部、曼彻斯特的山顶、圣安德烈亚斯断层山脉，印第安纳州、堪萨斯州、爱荷华州、内布拉斯加州和明尼苏达（该地区平坦的农用地上常年有持续稳定的风刮过）、新墨西哥州的山脉等地区。

这些地点包括风几乎是不间断地吹的山区以及风受到较小障碍和阻力的平原。其他适合的地点包括沿太平洋和大西洋的海岸线以及大型湖泊的周边，例如在加拿大安大略湖西部的湖岸。另外还有瑞典、英国和其他国家，那里强风通常出现在远海岸。

除了地理位置外，安置风力机时另一个需要考虑的因素是风力机必须安置在能够方便并网的地区。而一些风速稳定的理想安装地点可能会因为需要很长的电能输送电缆和高额的塔架运送费用使成本大大升高，因此这些地方并不是最理想的风场。

2.4　风速变化

往往一个地区的气候对本地区的风力资源产生重要影响，而这些影响有时候甚至会持续几十年。例如，19 世纪 30 年代，堪萨斯州西南部、科罗拉多州东南部、德克萨斯州和俄克拉荷马州的西弗吉尼亚出现了长期的干旱。这些地区的植被和农作物开始干枯的时候，大风天气越来越频繁并且持续时间越来越长，直至形成沙尘暴。这样的强风持续了几年，一直到干旱时期结束植被重新长出。美国的其他一些地区也同样发生了因气候变化导致的风速及其持续时间的变化。科学家记录了这些变化，但是因为很长时间才会发生一次这种情况，所以在风场选址时不会对这种情况关注太多。但是研究和从事风场选址的工程技术人员在选址时必须考虑备选地址的大气、地理因素以及由其产生的风速及其持续时间的变化。

2.5　风速的季节变化和年度变化特性

风力资源的季节性和年度性变化是工程技术人员在风场选址时必须考虑的一个因素。这些变化往往是因为季节交替导致的。例如，一些地区可能在冬季存在持续的强风，在天气温暖的夏季风速反而会减小且多变，而在另外一些地区却相反。这些情况在美国南部地区较为常见。当对一个潜在的风场进行调研时，应该考虑这个地区连续数月的风力资源情况，以保证建成后风场对外能够持续供电。因此，风力资源随季节变化明显的地区显然不是理想的风场地址。这些地区往往在一段时间内风力资源丰沛，电力输出强劲，而在另一些时间段内则风能偏小，以致电力输出盈利不足以回收风电投资及维护费用。

对于海上风场，风的季节性和年度性变化也是一个必须考虑的因素。一些地区会在夏季和初秋的时候刮起持续数月的飓风。虽然这些地区有足够的风力资源，但是热带雷雨和飓风天气很可能会损坏风力机及其安装平台，因此这些地区并不是合适的风场地址。有一些地区可能风速合适，但是另一个必须考虑的因素就是浮冰。浮冰会因为水位或风吹的原因发生移动，对风力机安装平台的安全性产生影响。

因此，在风场选址时，工程技术人员往往倾向于风速随季节性变化小的地区。一个理想的风场地址应该是一年四季有相同风力强度，这样就可以保证稳定可靠的功率输出，但是风力不足的地区肯定也是不行的。有些地区虽然风力资源波动大，但是一年中持续数月的强风发出的电能大于收回风场投资的最小值时，也可以选为风场。

2.6　风速的昼夜变化

另一个风场选址必须考虑的因素是风速的昼夜变化。在一些地区，当夜晚地表

温度下降时，风速甚至会降至零。如果夜间风不能发出和白天一样多的电能，那么这个地区可能就不能用作风场，因为虽然夜间电力需求有微弱的减小，但是电力需求仍然很大。如果风力机是作为火力发电或者核电的备用电源，上述因素就显得不是那么重要了。另一种情况是在一些小的居住区，如果有类似电池的储能设备，在白天电力生产充足且有风吹过时，将电能储存在电池里，就可以在风电生产不足的晚上或其他需要的时候使用电池放出电能来满足用户的需要。

2.7 紊流

当流体沿直线流动时叫作层流，发生扰动或不沿直线流动时叫作紊流（也称湍流或扰流）。风也是一种流体。当风不沿直线流动或者流速随时间变化时，就需要考虑风的扰动性，这种风也被叫作紊流。这样的风并不能发出与沿直线流动的风同样多的电能。另一个导致紊流的情况是暴风雨天气，暴风雨天气使得风速和风向变化急剧，导致风力机叶片上的受力变化剧烈。

还有一种紊流是当风吹过风力机叶片时在风力机尾部产生的旋转尾流。当只有一台风力机时这并不是问题，但是如果多台风力机安装在同一地址时，一台风力机产生的尾流就会影响另一台风力机。这样的问题有一定的随机性，并不是在所有的风速段都会发生。但是这样的问题可能在一些地区较为明显，所以多台机组的风电场选址更为复杂。

2.8 阵风风速

由于风的波动性，因此随时会有阵风吹过，尤其是风速很小或变化的时候。阵风来时，风速、风向会发生迅速的变化，同时风速也可能会在短时间内提高20% ~ 30%。这部分因速度短时提高而增加的风能并不能被风力发电机利用转化为电能。如果是风力机采用了某种技术保持发电机转速恒定，在阵风使风速增加时，叶片、转子和转轴就会有加快旋转的趋势，而在阵风过后又会有变慢的趋势。如果风速变化不连续，此时就会导致风力机应力急剧地变大或变小，会对叶片、转轴、传动机构产生很大的压力。

如果风力机采用的是变速技术，那么在阵风风速增加时，风力机就能发出更多的电能，反之则发出较少的电能。同时阵风风向的变化相应地会使风对风力机叶片的迎风角发生变化，这样就会降低风力机的风能捕获效率。

2.9 极端风速

有时风力机会经历超过风力机的最高设计风速的极端风速。此时，就需要通过

调节风力机的桨距角以保证叶片不会受到强风的正面冲击，进而降低风力机叶片的旋转速度。另一种调节风力机转速的方式是偏航控制，在强风时可以通过改变风力机机舱轴线和风向的夹角来保证风力机不捕获强风的所有风能。只有在最复杂的风力机中才安装兼有风速和风向传感器的偏航控制系统，它通过计算机判断是否超过了风力机的最高设计风速。在一些小容量、低成本的风力机中往往使用被动偏航控制，即通过风力机尾翼来实现风力机与风向的角度控制。

所有风力机都有一个基于风力机叶片和转子能够正常运行的最大设计风速。为了保护风力机不损坏，大部分风力机都有一个禁止风力机运行在极限风速外的保护模块，例如一些风力机使用机械或者液压制动。当控制器通过风速计检测到高风速时，控制器就发出指令，改变桨距角或者通过偏航控制来限制风力机叶片所承受的转矩。如果风速超过了风力机安全运行允许的最大值，控制器则会发出控制指令使风力机制动或闭锁转子，直至风速降低至安全区域。偏航、制动及液压控制在本书第 5 章里将详细介绍。

雷雨、飓风以及暴风雪天气是风场选址必须考虑的。例如，美国中西部地区在一年的大部分时间里存在较强的持续风力，但是该地区很容易受到春季雷雨的影响，雷雨往往引发会对风力机产生破坏性影响的龙卷风和暴风雪。人们开始开发和应用一些新技术来移动和调整风力机叶片，以保证其在极端天气下的安全性。当这些技术发展成熟后，很多现在不适宜开发为风场的地区将可以用来安装风力机。

上风式水平轴风力机在强风天气下其叶片尖端很可能会向其背后的塔架侧弯曲。为了保证风力机在高风速时的安全性，对风力机叶片的强度要求很高，这样就可以使叶尖的受力弯曲相对较小。虽然这样会使叶片的效率变低，但是对于保证叶片及塔架的安全性还是必要的。风力机机舱的设计也考虑到了上述问题，通过调整机舱位置使叶片离塔架尽量远。另一种方法是使用下风式风力机，这种风力机运行时风先通过塔架后吹向叶片。所以当强风吹过时，该类型风力机叶片会向远离塔架的方向弯曲，从而不会对塔架造成损坏。

2.10　风速预测

风速及其持续时间预测对风场选址是十分必要的，对于购买风力机也是非常重要的，因为这关系到投资回报（ROI）的问题。这个问题的研究随着美国及世界范围内的风力机装机数量的增加而不断成熟。通过数据采集与监视控制系统（SCADA）采集到的风速数据可以存储在数据箱以用于后续分析。

近 20 年来，在很多领域内风速预测显得越来越重要，例如在航海、露天水域的比赛项目以及航空。无论是为了利用风能还是避免强风引起的损害，上述的这些活动都很依赖风速的及时判断和预测来规划和安排。这项技术现在也被用来预测潜在风场的风况。基于一个地区的往年风速和风向规律可以建立一个适合本地区风况

的天气模型，通过这个模型并结合本地的天气报告及卫星云图可以预测某月或某年的风力强度及持续时间。整合上述各种数据和风力机参数就可以精确地计算出一台安装在本地区的风力机的发电量。

如果一个地方已经有一台或者多台风力机正在运行，那么上述数据是在有风力机运行的风场内采集的，这些信息将更加准确可靠，而风的模型也将更加接近实际。另一个有用的信息是本地区多年来针对某一特定区域的天气情况记录，例如在过去 50 年，气象站、电视台以及其他公共设施所采集到的长时间气象数据，包括温度、湿度、风速、风向。将这些信息结合到复杂的模型中，就可以用以预测在一年时间跨度内的风能情况。一些公司配备有大型的数据库来存储这些信息，并将这些数据信息出售给有意在此地区安装风力机的公司。在过去这些年里，采集和预测风能的准确性大大提高，这对选择风力机的安装位置有很大的帮助。

将上述数据和安装有数据采集与监视控制（SCADA）系统的风力机的运行信息结合在一起，将对风能预测有更高的实用价值。数据采集与监视控制（SCADA）系统采集的信息不仅有风速和风向，还包含风力发电机发出的电能数量。这些信息是很有用的，因为它显示了当前的风速和叶片是否为最佳迎风角，以及风速太高或太低时的叶片节距调节方式。一个地区风力机安装越多，上述这些信息的预测会越准确。

2.11 风场的尾流效应

工程技术人员很早就发现了多风力机风场每台风力机的尾流效应。美国国家航空航天局（NASA）早在 20 世纪七八十年代就对这一现象进行了全面的研究。1974 ~ 1981 年，在美国国家科学基金会（NSF）和美国能源研究开发署（ERDA）的一项基金支持下，位于美国俄亥俄州克利夫兰市的美国国家航空航天局（NASA）在其所在地建造了一台 100kW 的风力机并开展了现场实验。作为这项研究的一部分，NASA 进行了风力机的烟雾轨迹测试以确定风力机机尾扰动的影响。如图 2-1 所示，烟雾可以演示双翼风力机的尾流效应模式。这个实验搜集到了很多重要的数据，通过这些数据可以确定风场中风力机之间的最小距离。

图 2-1 NASA 使用风力机进行的风扰动烟雾轨迹测试（图片来源：美国能源部）

在大量风力机聚集的风场中风向将不断改变，在某些位置的风力机往往会处在其他

风力机的尾流之中。在一些区域，无论怎样安排风力机的位置，一些风力机还是会不可避免地受到其他风力机尾流的影响。此时，尾流效应会降低风力机捕获风能的效率。图 2-2 展示了同一风场的一些风力机的扰动影响。多台风力机距离较近时，风通过一台风力机的叶片时可能会产生扰动，而这些扰动往往会对与处在一条直线上的其他风力机产生影响。此时在扰流中的风力机捕获的风能与风最先吹过的风力机相比将大大减少。如果在这条直线上还有其他风力机，则捕获风能的效率同样会大大降低。因此在很多风场，风力机的位置布局都是尽量减小尾流效应的影响。

图 2-2　风力机成排排列时，可能会有尾流效应
（图片来源：EWT International）

一种减小尾流效应的方法就是合理安排风力机之间的距离，使前一个风力机产生的尾流效应不会影响后面的风力机。工程技术人员可以借助应用软件和从风力机采集来的数据确定合适的风力机间距。

图 2-3 表示了一个多风力机风场，从中可以看出不至于发生尾流效应影响的风力机合适间距。

图 2-3　美国明尼苏达州的一个多风力机风场
（图片来源：John Fellbauet，jfellhauer@ surenergy. us）

2.12 复杂地形引起的紊流

复杂地形引起的紊流也会对风力机产生影响。例如，风吹过山脉或者是其他障碍物时，在障碍物的背面就会产生紊流扰动。这些扰动的强度很可能使这些地区不适合建立风场。

这种类型的紊流也会发生在森林地区。如果风力机安装在森林附近，在某些时段，森林可能帮助减少风中的紊流。但如果风从反方向吹来，即先通过森林时，将可能产生很强的紊流。这样的话，这个地区也是不适合安装风力机的。

如果风力机安装在城市的边缘，紊流也是必须考虑的因素之一。和森林类似，如果风先吹过风力机，那将没有任何问题。但是如果风先吹过城市，在其到达风力机之前可能会有很多扰动。

因地形原因产生的紊流只可能在风吹过一座建筑物、一棵小树时发生。针对这种情况，一种解决方法是尽量提高风力机的高度。升高高度不仅可以减小紊流的影响，还可以使风力机捕获更大的风能。这就是现代一些大型风力机安装在超过300ft 高度的塔架上的原因。

2.13 根据需求选定风场装机容量

在选定风力机容量之前，首先要明确风力发电机的负荷类型。例如，使用风力机给一户人家或者一个商户供电，这时首先应该确定电力供应的用途和电力需求量。在美国，一个拥有两个成人、两个小孩的家庭年耗电量约为 4500kW · h，这意味着风力机每天的发电量应是 12.33kW · h[㊀]。

因为风力机发电量在不同时段内有所差别，如昼夜、不同的天，不同的季节等，因此必须确保风力机的月发电量或者年发电量是足够的。这个问题可以通过采用电池或电网作为备用电源，以使用户可以得到持续不断的电能供应。

以 4500kW · h 的年平均负荷为例，可计算出发出这些电能所需要的风力机容量。另一个原则是，每 1kW 的功率需要的风力机叶片直径约为 1m，所以在为年用电量为 4500kW · h 的用户供电时，需要叶片直径约为 5m 的风力发电机。

2.13.1 商业应用中风电系统容量的确定

商业供电是风力发电的另一个典型应用。例如，汽车代理商运营成本中很大一部分是照明用电。这种类型的应用适合将一台风力机或多台小型风力机安装在照明塔杆上，或者安装于专门建造的塔架（照明设备也可安装在塔架上）。图 2-4 所示为小型风力机直接安装在汽车代理商的照明设备顶端。

㊀ 原文误为“这意味着风力机每天的发电量是 1.45kW · h”，应为“4500kW · h/365 = 12.33kW · h”。——译者注

图 2-4　风力机安装在现有的照明设备上（图片来源：西南风电）

另外，对于特定的电力供应，确定风力机安装的场所是很重要的。在一些场合，风力机用来给一部分而不是所有的电力负荷供电。这类应用中，一台 50kW 的风力机在平均风速为 12mile/h 的情况下每年可以发出 87000kW · h 的电能。一台 50kW 的风力机的叶片直径接近 50ft，因此转子和轮毂的中心线高度至少为 80ft。因为商业应用多在城市内部，所以这可能与城市管理部门制定的有关建筑物高度的限制性条款发生冲突。因此，在一些商业应用中往往会选择使用一些容量较小的 10kW 风力机，而不是一台 100kW 风力机。小容量风力机可以安装在用来安装常规照明设备的塔架上，这样就不会受到上述管理条例的限制。在这类应用中，风力机给电池充电，照明设备使用电池中存储的电能直到电池放电结束，此时开关转换至传统的电网供电。

风力机的另一个应用场合是市政供水和废水处理厂。这些设施中的大功率水泵消耗大量的电能。这些场所的负荷比较稳定，可以用风力机供应大部分用电负荷，此时风力机容量为 100 ~ 250kW。风力机容量的决定因素有很多，如日负荷量等。如果风力机安装在城市内部或者是居民区附近，风力机的高度限制、噪声等级也将是必须考虑的因素。在上述应用中，风力机在给水处理系统供电时如有盈余，就可以将多余电能馈回给与之相连的电网，实现盈利。当风电不足以满足需要时，保持与电网的连接是必不可少的，因为可以在风力机供电不足时由电网补充供电。

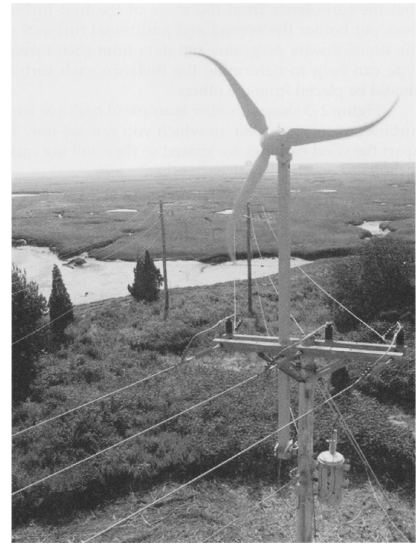


图 2-5　风力机位于输电线路上
（图片来源：西南风电）

风力机的另一个用途是给偏远地区供电。如图 2-5 所示，风力机安装在高压输电线路

上。风力机安装在既有的输电线塔架上，为电力线路的数据传输系统提供电力。

风力机还有其他的一些小型工业应用，如为可使用电网作为备用电源的非恒定负荷供电。风力机容量一般设计约为负荷的80%，其余的负荷由电网供电。图2-6所示的风力机用于铁路道闸的动作电源，这种电力负荷是很典型的，在大部分时间里风电为道闸的照明电源，其他时间由电网供电。

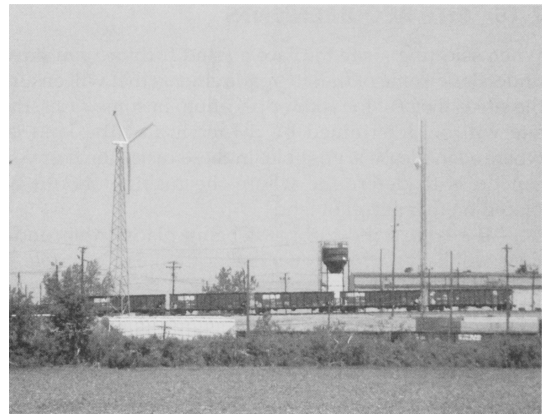


图2-6 风力机用于铁路道闸

2.13.2 风力机在校园中的应用

中等容量风力机的另一个理想安装地点是中学和大学校园的建筑物上。之所以选择这些建筑物有两个原因，一是因为这些建筑物白天用电量很大而在午夜时用电量很小，这一规律符合很多地方一天中风的吹动规律。这就意味着风力机容量可以按照建筑物的负荷功率来确定，风力机的发电功率和建筑的负荷功率将会保持一致。夜晚在风力变小时，负荷也将仅仅是建筑物和停车场的照明用电。尽管从电网得到的电能的价格越来越高，但是风力机发出的电能帮助维持总的电力开销不变。这使得风力机很适合应用在这些场所。

风力机安装在教育机构和大学校园里的另一个原因是，它可以给学生和教师提供一个更好的了解风能的平台，并可以时刻提醒学生和教师风能在提供可再生能源中起到的作用。如果教育机构在讲授可再生能源或者风能的课程，风力机将是很有用的辅助教学设备。另外，大学一年级的学生还可以在他们的测量和观察课程中使用这些风力机的数据。这些数据是一个实时的应用实例，通过这个实例，学生可以计算出风力机捕获的风能量和发电量。图2-7是一台安装在学校的风力机。

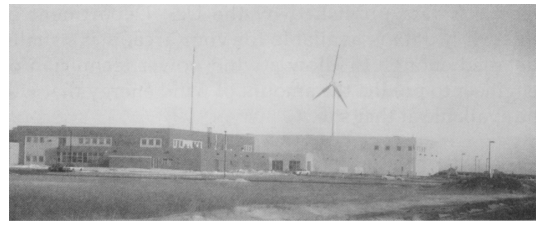


图2-7 校园里安装的风力机
（图片来源：John Fellbauet，jfellhauer@ surenergy. us）

2.14 如何确定一个地区的可利用风能

衡量一个地区风能的重要指标就是这个地区的风速及其持续时间。测量风能时

需在风力机安装的高度上进行，在离地面 30ft 处测得风能是最小的，但是在安装风力机的 180 ~ 300ft 高度上风能很可能是足够大的。

如果在一个地区附近安装有风力机，那么就可以使用附近风力机的 SCADA 系统收集的信息。如果这个地区此前没有安装过风力机，那么就需要对这个地区进行一段时间的风速测量以确定此地区的可利用风能资源。通过风速计或者自动测量设备可以自动地测量、记录一段时间内该地区的风向、风速及各风速的持续时间。这种测量可以在一分钟采样一次，连续采样一小时，取这些采样数据的平均值作为一小时内的平均风速。一个重要的注意事项就是测量设备要安放在正确的高度，并且在采集数据之前对设备进行校正。

风速测量设备需要能够与存储或者传输设备相连，这以便于将采集的数据存储在计算机或者是网站上以备后期分析。这项工作可以雇用专门的公司来完成，但是仅适用于大型的风电场，对于小型的居民区风电机组而言成本太高。

另一个获得平均风速等有用信息的途径是咨询美国能源部公布的风能数据。如果有所需地区风能数据的话，对于工程技术人员评估一个地区的风能资源而言这些数据是足够详细的。

2.15　影响风电的地方性法规

在 20 世纪七八十年代风力机开始大规模安装使用时，并没有很多法规对其进行约束。但是随着安装风力机数量的越来越多，一些地方政府开始制定法律、法规对风力机的规模、高度、安全性、噪声和安装位置进行限制。国家的法规趋于一致，都鼓励支持在任何条件允许的地点安装使用风力机，但各个地方政府则根据本地情况制定法律法规，一些鼓励风力机安装，另一些则是限制其发展速度。很多地区法规中都有同样一条规定，即对风力机高度做出了限制，这一限制有时使风力机不可能安装在合适的高度。

在一些私人的农业土地上安装风力机就很少被禁止，因为这里常常是农场，远离邻居和其他可能持反对意见的人。如果在居民区或是城市内部，安装风力机就会影响到其他邻居和附近生活的人。人们可能会出于安全考虑而限制风力机的规模，另一种考虑是人们感觉风力机太工业化、机械化了，与居住环境不协调。有些人可能认为在一些地区安装风力机也有其观赏价值，如维斯塔斯公司在湖边、海边和山脉上安装的风力机常常吸引很多游客前来观看。另外，风掠过叶片和叶片旋转时产生的噪声对一些居民区的生活会产生影响。

一些法规也涉及风力机是永久还是临时建筑物的问题。因为一般风力机的寿命上限是 20 ~ 40 年，即可能算是一种临时性建筑，那么就得考虑在其寿命终结时的拆解和清除问题，这也是在进行风场建设申请时必须一并提出的措施。

一些风能协会在尝试搜集和整理涉及居民区的法规，并根据这些法规来进行工程设计施工，从而尽量使市民不来阻挠风力发电设备安装。同时随着时间的流逝，其他新的问题还会出现，法律法规中也会出现新的限制性条款。

因为风力机输出的电能需要输送给风场以外的建筑物、电网，所以在并网的时候必须符合一些并网要求和规范。这其中包括一些国家的或者是地方性的电力规范。而且一些关于塔架的规范也适用于风力机的塔架。

2.16 风力机选址要求

在选择风力机安装地点时，应了解一些相关的要求，保证安装位置是最佳的。在某些情况下，安装位置取决于土地的拥有者，或者土地是否可以租赁。在这些情况下，需要做的仅是选择最佳的安装位置。

一个大型风力机的安装地点往往受很多因素的制约和限制。例如一个并网型风力发电系统必须安装在靠近电网线路通过的地方。为建筑物供电的风力机则须安装在该建筑物附近，这样就不需使用大量的线缆，因为线缆太长时，线路上的电压跌落就会增加。

风力机选址时要确保没有自然或人造的障碍物阻碍风的流动。在任何地点，一个或者多个阻碍风流动并且消耗风能的障碍物是很常见的。当拟定要在某地安装风力机时，一定要进行视野勘察，确保没有此类障碍物。

风力机必须是其附近最高的建筑物，因为必须保证桨叶有足够的空间来尽量多地捕获风能。这就是为什么很多风力机安装在农业生产地区，因为这些地区常常是在数公里内都是空旷的平地。风在这些地方不受任何扰动。另一个必须考虑的因素是公路交通，因为风力机运输、安装和实施保养维护都需要用到大型的起重机和运输工具。

2.17 选定合适的风力机安装地点

风力分布图是一个很好的风场选址辅助工具。图 2-8 所示为美国风力资源分布图。从图中可以看出大西洋、太平洋和墨西哥湾沿岸有很丰富的风力资源。通过气象服务可以获得能清楚确定实际风速和风向的额外分布图。图中风速以 mile/h 和 m/s 为单位。主要的天气网站一般都会提供风力分布图，并且每 5 ~ 6h 都会更新一次。

大型风力机对风速的要求是在 70m（230ft）左右高度处风速的最小值为 10 ~ 14mile/h，如果地点不允许安装更高的塔架或者多数时间风速均为最低值，则风力机的发电量将无法收回其前期投入。

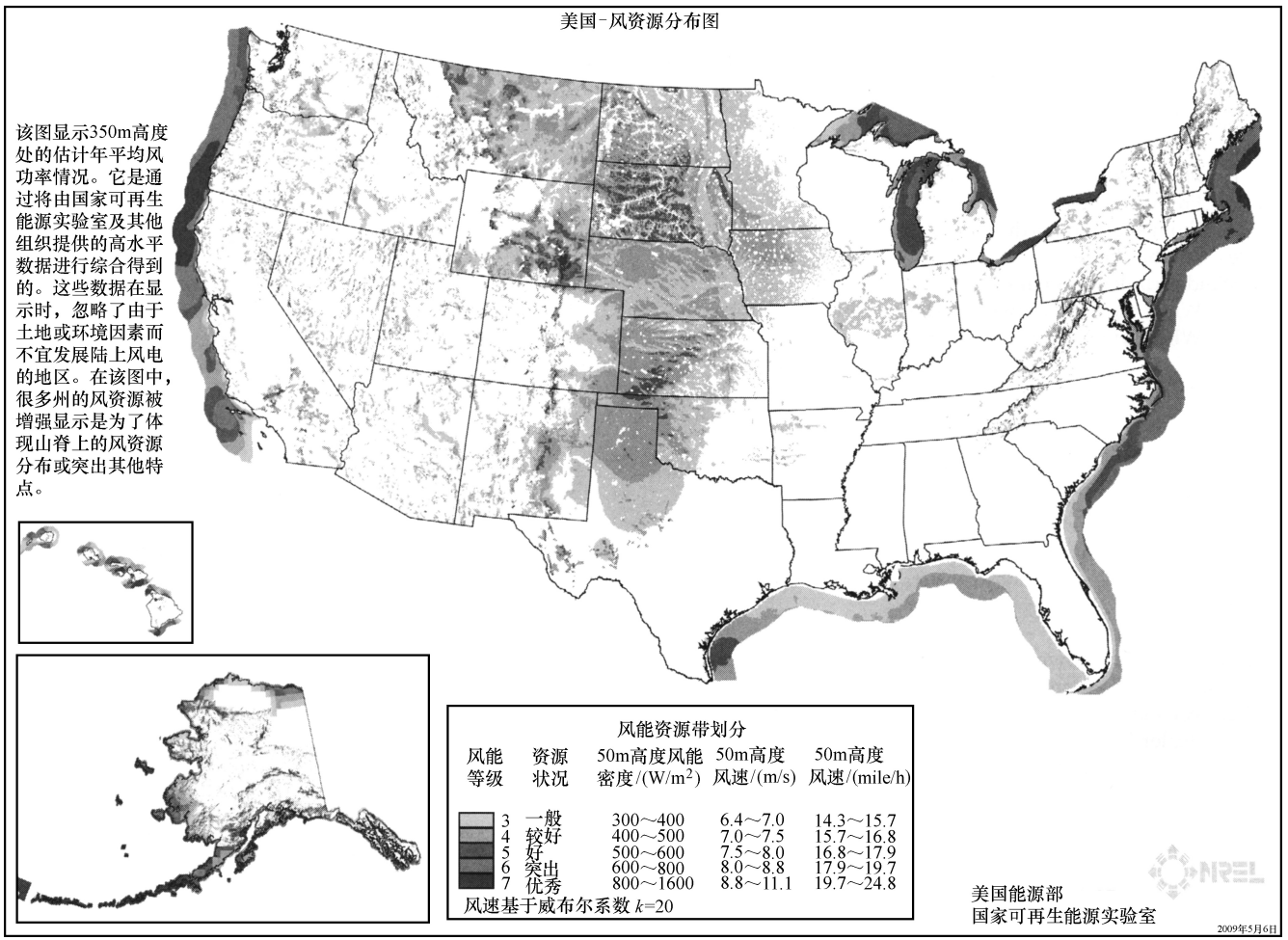


图2-8 美国风力资源分布图(图片来源:美国能源部,国家可再生能源实验室)

简 答 题

1. 定义大气压力。
2. 解释风流动的原因。
3. 解释海风的形成过程。
4. 解释陆风的形成过程。
5. 解释从夏季到冬季风速变化的原因。
6. 解释昼夜风速不同的原因。
7. 为什么风场内风力机之间会产生尾流效应？
8. 举例：风力机的某些商业应用（三种）。
9. 风场选址时应该考虑的两个因素是什么？
10. 在风场选址时如何确定某地的风能资源？

选 择 题

1. 什么是风力分布图？（　　）

a. 风力分布图表示的是风开始吹动时的平均温度。

b. 风力分布图表示的是一天内风吹动的平均时间。

c. 风力分布图表示的是一个地区在一定时间内的风速和风向。

2. 大气压力是（　　）。

a. 海平面附近约为 100lbf/in^2

b. 海平面附近约为 14.7lbf/in^2

c. 海平面附近约为 20lbf/in^2

3. 一般来说，风吹（　　）。

a. 白天比夜间强

b. 夜间比白天强

c. 白天夜间一样强度

4. 海风（　　）。

a. 夜晚由海上吹向陆地

b. 夜晚由陆地吹向海上

c. 可能由海上吹向陆地，也可能由陆地吹向海上

5. 美国盛行风向为（　　）。

a. 从东向西

b. 从北向南

c. 从西向东

d. 从南向北
e. 上述全部
6. 风紊流发生在（　　）。
a. 当风沿直线吹动时
b. 当风盘旋时或者是不沿直线吹时
c. 当冬天风吹得更强时
7. 为何风力太强是对风力机也是一个问题？（　　）
a. 强风会对风力机塔架产生很强的压力。
b. 强风会使风力机叶片发生弯曲和承受过高的压力。
c. 强风会使风力机叶片旋转过快。
d. 上述所有。
e. a 和 c。
8. 下列哪项为风力机的商业或者工业应用？（　　）
a. 风力机安装在汽车代理商的照明设备上。
b. 风力机安装在废水处理场。
c. 风力机安装在铁路道闸上。
d. 上述所有。
e. a 和 b。
9. 下列哪项为风力机安装在学校或者校园里的优点？（　　）
a. 风力机能够减少电力消耗支出。
b. 风力机可以作为学校的一个实验器材。
c. 学校的电力消耗波动不大，这点有利于风力机的应用。
d. 上述所有。
e. b 和 c。
10. 下列哪项可能是地方或国家法规里涉及风力机安装的条款？（　　）
a. 高度限制，这点会限制风力机塔架的高度。
b. 噪声限制，这点可能会限制风力机在居民区或者一些其他地方安装。
c. 风力机是一个永久性建筑物还是临时性建筑的问题。
d. 上述所有。
e. a 和 c。

第 3 章　垂直轴及水平轴风力机的运行

本章学习目标

读完本章后你将能够：

- 了解垂直轴风力机的优缺点。
- 了解水平轴风力机的优缺点。
- 理解风如何驱动风力机叶片旋转。
- 识别升力如何使风力机叶片把风能转换为电能。
- 理解有助于提高升力的风力机叶片设计方法。
- 了解单叶片、双叶片、三叶片水平轴风力机的优缺点。

本章关键词

机翼（Airfoil）
攻角（Angle of attack）
下风式水平轴风力机（Downwind horizontal-axis wind turbine）
阻力（Drag）
收桨（Furling）
水平轴风力机（Horizontal-axis wind turbine）
前缘（Leading edge）
升力（Lift）
升力阻力比（Lift-to-drag ratio）
机舱（Nacelle）
失速（Stall）
摇晃（Teetering）
叶尖速度（Tip speed）
尾缘（Trailing edge）
转矩（Torque）
上风式水平轴风力机（Upwind horizontal-axis wind turbine）
垂直轴风力机（Vertical-axis wind turbine）

本章概述

本章概述了垂直轴和水平轴风力机的运行情况，介绍了在学习这些风力机时要遇到的专业词组和词汇，也介绍了与垂直轴、水平轴风力机有关的硬件。在后面几章中将深入了解更多的关于运行原理、安装、故障诊断和维修的细节。

本章包含了很多关于风力机的叶片运转、风力机类型、单叶片、双叶片、三叶片水平轴风力机的图片和图表，以及各种类型风力机优缺点的比较，能帮助理解当今风力机的各种设计和控制方法，与此同时，学习到某种类型的风力机为什么需要这样设计。

3.1　风力机叶片概述

风力机叶片也称为机翼，每一种风力机叶片的设计都不同，要理解机翼需熟悉

一些专用词汇，如升力、阻力、升力阻力比、失速、攻角和转矩。这部分解释了风力机叶片与飞机的螺旋桨的相似性，并且这样的设计如何将风能转为电能，通过熟悉这些词汇来理解风力机叶片设计与应用技术。

3.1.1　升力

升力被定义为：空气流过叶片时，在其上方产生了一个低压区，从而使得它上升的作用力。低压区的出现是因为空气在机翼上方流过的距离比下方长，因为同样的空气流过上下两面，所以产生压差。图 3-1 表示了空气流过机翼产生升力的情况。机翼上方的压力小于下方，产生了机翼的升力，这种升力也用于飞机机翼使得飞机上升，空气越快地流过机翼，升力就越大。

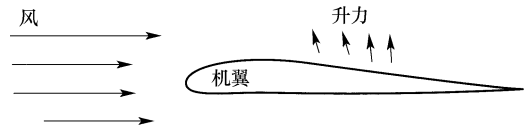


图 3-1　空气流过机翼在叶片上方产生升力

当风流过风力机叶片时，也产生如同升力一样的效果，使得风力机叶片旋转。简单地讲，空气流过风力机叶片的上方（圆面）产生低压区，压差使得风推动叶片平的一面而拉动圆的一面，所以叶片开始向低压区转动。另一个思考方式是当风吹过叶片，叶片以叶片前缘向着叶片旋转方向的方式转动。图 3-2 所示为风力机叶片的前缘和尾缘。

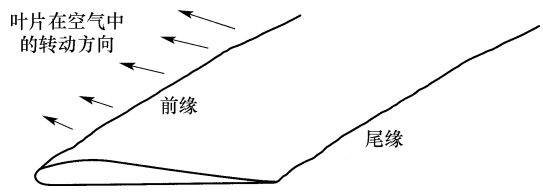


图 3-2　典型风力机叶片，所示为叶片在空气流中的转动方向，标出了叶片前缘和尾缘

风越大，压差越大，叶片旋转越快，获取的动能越多，这个能量通过叶片被固定的机械轴转化为旋转能量。在一些风力机中，发电机被安放在轴的另一端；而另一些风力机中叶片驱动的转轴也许被连在一个动力传送装置上，而后者第二个转轴驱动发电机。当升力增加时，叶片更容易地在空中旋转。

3.1.2　攻角

风向与叶片截面弦线形成的角度称为攻角，如图 3-3a 所示，当风直接流过叶片时，攻角为零；当叶片的前部向上转动时，攻角增加，如图 3-3b 所示，此时升力增加；当叶片转到能产生最大升力时，如图 3-3c 所示，攻角最大，这个角度称为临界攻角。当攻角增大到临界攻角时，风力机叶片开始失去转换风能的能力。

图 3-4 所示为一个可获取最大风能的叶片，此时叶片和转子都最快地旋转。叶片节距角可被调整，图 3-5 所示为叶片的节距角改变以至于叶片的前缘直接对着风，而尾缘背着风。这个位置，风力机叶片获取风能的最小，所以叶片不旋转。当风力机处于维护期间时叶片处于该图所示的这种位置，并且采用制动措施保持叶片不旋转。

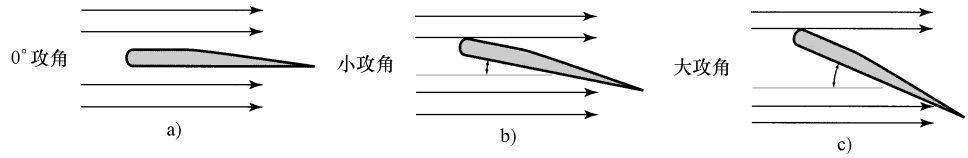


图 3-3 叶片根据风向改变节距角

a）叶片平行于风速，此时攻角为 0° b）叶片向上轻微转动，此时攻角较小

c）叶片向上转动到最大位置，此时攻角最大

图 3-4 风力机叶片对风可以获取最大的风能并且转速最快

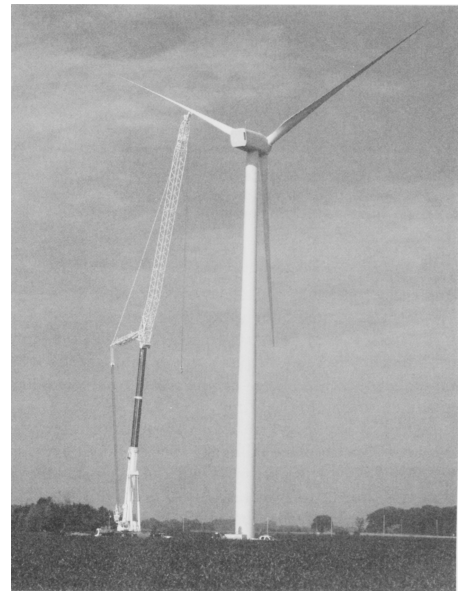


图 3-5 叶片的节距角改变以至于叶片的前缘直接对着风，而尾缘背着风。这个位置风力机叶片不旋转，处在维护期间

3.1.3 节距角控制和失速控制

风力机设计者使用失速的概念来控制叶片的最大速度防止发电机过载。失速发生时叶片几乎是平的，不再有升力。风力机受限于它所处地域的最大和最小风速。有时候例如暴风雪等极端恶劣的气候环境会产生强风，当有强风时，叶片加速旋转，发电机的输出会增加到某一个值，此时发电机过载并且被损坏。有两个基本方法来控制叶片的速度：节距角控制和失速控制。当在强风时使用节距角来控制叶片速度时，风力机上的控制系统使用一些风速仪表如风速计来测量风速，控制器根据风速数据把叶片节距角调整到叶片开始失速的一个点，此时风力机叶片产生越来越少的转矩，叶片开始减速，就好像风速减慢一样（有时称其为叶片收桨）。如果使用节距角可变的叶片，叶片速度就会慢慢降低直到叶片的狭窄剖面面临进风，叶片不再获取风能。

在一些风力机中，节距角控制是被动的，因此无论何时它的转速变得过大时，

叶片将会运行于开始失速的工作点。可以利用被动的节距角控制防止风力机超速。可以在本书第 5 章学习更多关于叶片节距控制（变桨控制）的内容。

有些风力机使用失速的概念。在有失速装置的风力机上，叶片在运转时不会调整，相反地，它们被锁定在一个位置，称为固定节距角。失速是通过叶片的基本设计完成的，它使叶片在风速超过某一个安全速度时自然而然地失速。这个设计使得叶片在风速低于设定风速时获取最大量的风能，当风速变高时叶片失速。

3.1.4　阻力

阻力是机翼在空气中旋转时阻碍机翼转动的力。图 3-6 所示机翼在空中旋转，阻力阻碍机翼试图使其停转。需要说明的是当叶片转动时，其前缘对着风吹来的方向。

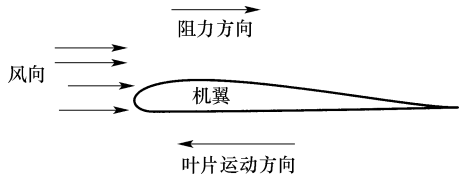


图 3-6　叶片向左旋转，阻力施加于叶片前缘并且与风向相同

阻力可用阻力系数表示，它是一个无量纲的数。通常情况下，风力机叶片用于计算阻力的部分是叶片的前缘，因为它直接对着风。设计者试图设计出阻力最小的叶片，如果可以使阻力很小，叶片将会更好地把风能转化为电能。当阻力增加时，叶片的效率下降。

一台风力机叶片的典型阻力系数为 0.04，而相比下汽车典型的阻力系数为 0.3。虽然风力机叶片的阻力系数基本保持不变，但当风速增加时，其承受的阻力也会增加。阻力系数越小，空气动力效率越高。

3.1.5　叶片升力阻力比

升力阻力比是升力值阻力值之比，大的升力和小的阻力可以提供大的升力阻力比。升力阻力比越大，叶片把风能转化为机械能㊀的效率就越高，这样发电机就产生更多的电能。大部分风力机在接近叶顶处都有最高的升力阻力比，叶片如此设计，因此在连接中心的区域叶片有更大的质量更高的力度，而接近叶顶的地方质量要减少因此升力增加阻力降低。

叶片的阻力不是固定的，当风速增大时，升力和阻力都以风速二次方的关系增大，当空气变得稠密，产生的阻力也增加。这意味着当空气变冷变得更加稠密时，它产生的阻力也增加。当风力机安装在空气稀薄的高海拔地区时，阻力要比低纬度地区低。当湿度增加或如果下雨或下雪时阻力也增加，意味着尽管因为叶片设计而造成的阻力损失不变，但阻力大小将持续改变。

3.1.6　叶尖速度

叶尖是叶片旋转时速度最快的叶片顶端部分，相反地，叶片连接中心的地方最靠近转轴，是叶片旋转时速度最慢的地方。叶尖速度是叶片顶端在空气旋转时的测量线速度，因为叶尖转动最快，它承受叶片旋转时，由于离心力造成的相当大的作

㊀ 原文误为“轴的转矩”，应该为“机械能”。——译者注

用力，所以设计者必须注意到风力机可以应付的每一个叶片的最大叶尖速度和可估计的最大风速。

较高的叶尖速度为 65 ~ 85m/s，即 145 ~ 190mile/h。为了提高叶片效率，往往需要较高的叶尖速度，然而在高速下，叶片承受较大的压力，增加了损坏几率。

设计叶片要使得其能过承受较高的风速和发电机负荷。用特殊的材料制作能使它经受数年的暴晒与各种天气，并且能够承受风扰动带来的高转速或大转矩冲击。另一个对叶片速度重要的专业词是叶尖速比，它是叶尖速度和风速的比值，6 ~ 7 范围内的叶尖速比是最理想的，该值越低，叶片效率越低。

有一点需要指出，为了获取同样的能量，风力机叶片越少，叶片要转得越快。例如获取同样的能量，三叶片风力机不需要像双叶片风力机转动得那么快，因此双叶片风力机和三叶片风力机的叶尖速比不同。

叶尖速度通常在叶片设计阶段考虑，此时风力机功率和叶片大小都要被考虑进去。一旦风力机被安装好，以 r/min 表示的叶片旋转速度就要用来具体确定切入速度，即叶片可旋转的最低速度并且在此速度下仍然可以获取电能，以及切出速度，即风力机可被允许工作而不至于损坏的最高转速。

3.2 风力机的类型

当今使用的风力机有两种类型：垂直轴风力机和水平轴风力机。

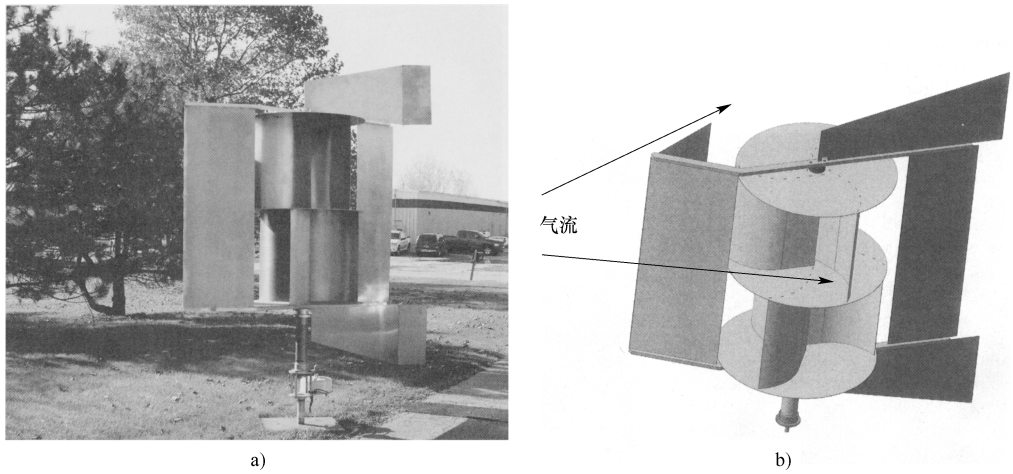
3.2.1 垂直轴风力机

垂直轴风力机有两种类型：像鸡蛋搅拌器一样的达里厄风力机和萨沃尼斯风力机，图 3-7 所示为一个巨型的达里厄风力机，通过站在工作台上的工人作为参照可看出风力机的大小，这种风力机的一个优势是它可获取任何风向的风能。

图 3-7 达里厄风力机
（图片来源：美国能源部）

图 3-8a 所示的照片和图 3-8b 所示的图片是萨沃尼斯风力机，给它增加旋翼能让其比传统的萨沃尼斯风力机更有效率，图片是所增加旋翼的俯视图，这个设计最重要的方面是旋翼和半圆柱形叶片。首先，被加在风力机前部和尾部的旋翼使装置总是指向风并且引风进入风力机；第二，风力机叶片就如同飞机的机翼，在叶片上产生动力而在叶片后部产生阻力，这样就产生升力推动叶片，以比流过叶片风速还高的速度旋转；第

三，前翼的导向部分把风引向右边叶片的外层。在萨沃尼斯设计中，风轮没有旋翼，风来自风轮的前部并转动风轮，然而风也会从风轮的后部流过，这起到反作用减慢转速。图 3-8b 所示箭头表示了前翼的导向器如何把风引导到叶片的左边和右边，被引到叶片左边的风阻止了在风轮后部的反作用力，风吹动右边叶片的外层与吹过左边叶片的后部共同作用增强了风力机的性能。



a)　　b)

图 3-8　a）有一个叶片的垂直轴萨沃尼斯风力机　b）加叶片后的萨沃尼斯风力机（图片来源：www. insol. us）

3. 2. 2　水平轴风力机

20 世纪 80 年代安装的几个垂直轴风力机都足够供应当时所需要的电能，但都已不再使用。多数情况下，垂直轴风力机没有水平轴风力机效率高，如今所用的垂直轴风力机主要用于居民用电或者存在噪声和高度限制的地方，更大的风力机通常是水平轴风力机，图 3-9 所示为一个典型的水平轴风力机。

水平轴风力机分为上风式和下风式两种，上风式水平轴风力机的特点是风先吹过叶片再吹过发电机，下风式水平轴风力机的特点是风先吹过发电机和机舱然后吹过叶片，图 3-10 为上风式水平轴风力机，图 3-11 为下风式水平轴风力机。

因为上风式风力机具有需要迎风的风轮，因此它的一个优点是可以避免叶片位于塔架的后方。叶片如果位于塔架后方，塔架会对吹向叶片的气流造成影响。绝大多数风力机采用了上风式设计。

图 3-9　水平轴风力机

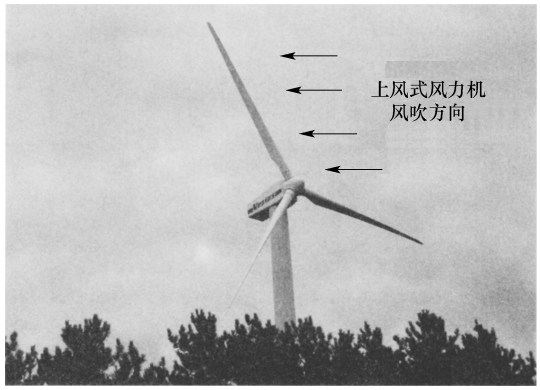


图 3-10 上风式水平轴风力机

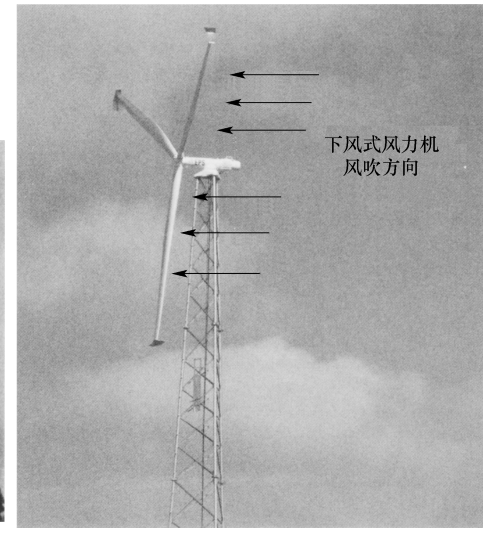


图 3-11 下风式水平轴风力机

上风式水平轴风力机的第一个问题是转子要有较高刚性和较低的柔性，而且必须被放置在距离塔架前方一定距离的位置，因为叶片在强风中会呈现出柔性变形。如果在塔架前方不够远处，强风就会使叶片弹回塔架造成损坏。叶片回击通常发生在风速突然改变时。第二个问题是上风式水平轴风力机需要某种方法保持风轮转轴时刻与风向一致。风力机叶片的朝向称为偏航，风力机叶轮的方向需要连续变化使得风力机最有效地发出电能，这是由风力机的偏航控制完成的。风力机必须自动地指向风向来最有效地获取能量。

下风式水平轴风力机的风轮转轴安放在塔架的下风处或下风带，因为发电机和中心装置在下风带，所以叶片的任何摆动都会使叶尖远离塔架从而不会撞击到塔架。一些小的下风式水平轴风力机通常设计为使其在没有偏航控制装置下实现自我定位，这称为被动偏航，可以让系统更加经济。偏航转动必须控制或限制使得发电机旋转不超过特定的圈数，以防止连接风力发电机和地面终端的电缆线被缠绕或扯断。在一些更大的风力机中，偏航控制系统包含一个旋转计数器，旋转数被限制在 5 个全转之内。另一种方式来弥补旋转 360°以上的偏航是使用集电环，集电环使得机舱和塔顶上电缆线所连接的点之间的电气连接是连续的，即使当机舱的偏航旋转增倍。但是集电环自身存在问题，因为发电机产生的所有电能必须流过它们输送到安装在地面设备的电缆线，集电环会迅速磨损，因此集电环需要及时的检查和细致的维护。因为集电环在塔架的顶部，所以需要攀爬塔架来维护它们。

在大型风力机中，主动偏航用来控制风力机叶片对风，这类控制利用永磁高转矩电动机或液压马达来旋转风力机机舱，偏航电动机被 PLC 控制，它从测量风速和风向仪表接收信号，与风力机的速度进行比较。大型的风力机中叶片被连接在一个转轴上，而此转轴连入多速传动系统，发电机接在传动系统的另一端，发电机的

速度被严格控制以输出 60Hz 电能。如果风速增加过快，偏航控制可用来改变风轮的朝向，这可以作为一种控制风力机的旋转速度达到 60Hz 电力输出的手段。风力机同样使用节距角控制来控制叶片随风速而变化的速度。在本书第 5 章将介绍关于风力机控制的更多细节。

3.3　垂直轴风力机

垂直轴风力机用在风速低且风向不稳定的地方，通常它们不用来商业化发电，然而在居民区和城市地区，由于噪声和高度的限制不允许使用水平轴风力机，垂直轴风力机也会得以应用。垂直轴风力机工作振动水平低，且无论风速和风向怎样它们都会产生电能。

垂直轴风力机的一个特点是不用考虑风力机的朝向，因为它们是圆形的，所以无论风向如何它都会发电。目前垂直轴风力机没有水平轴风力机使用广泛，事实上，垂直轴风力机只占当今使用风力机中的一小部分。对于垂直轴风力机和水平轴风力机之间的选择没有可比性，而应该根据在应用和实际安装地点中能够产生最好效果来选择最佳机型。

图 3-12 是达里厄风力机，图 3-13 是萨沃尼斯风力机。萨沃尼斯风力机利用阻力产生旋转能量，达里厄风力机利用升力使转轴旋转，图 3-13 中可以看到固定在叶片下方的发电机。

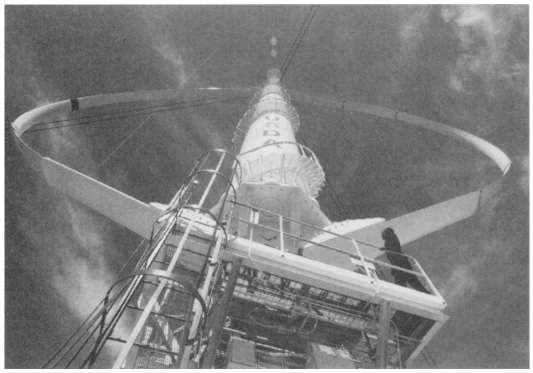


图 3-12　达里厄型垂直轴风力机
（图片来源：美国能源部）

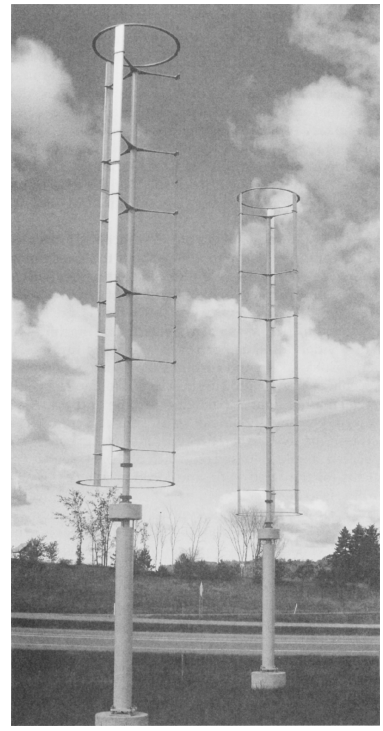


图 3-13　萨沃尼斯型垂直轴风力机

垂直轴风力机可以在低速和宽转速范围内正常发电，所以没有必要使发电机的速度恒定。由于垂直轴风力机因为发电机的速度不是恒定的，所以输出电压的频率不总是60Hz；一般利用变频器将发电机输出变换为单相60Hz电压或三相60Hz交流电压。有时还采用其他的电器元件把交流电压变为直流电压，或者直接采用直流发电机产生直流电压。

图3-14 Quietrevolution的QR5型垂直轴风力机（图片来源：Quietrevolution）

图3-14所示为另一类垂直轴风力机——Quietrevolution的QR5型，这个装置看起来像艺术品，然而它在低转速和可变转速下产生足够的电能供家庭以及小的单位使用。这种装置需要三相电气连接，这在一些小的商业或住宅区没法实现。这类小型垂直轴风力机大约是5万美元，只在美国有售。转子大约5m（16.4ft）高，直径3.1m（10.17ft），大约重450kg（990lb），叶片坐落在3.4m（11.15ft）的轴上，为此高度限制是一个要考虑的问题。叶片也可能安装在位于下倾式机罩上长度为6m（19.69ft）或15m（49.21ft）的轴上。

这类风力机使用直驱永磁同步发电机，发电机被集成在风力机部分，14m/s的风速产生的功率峰值是7.4kW的交流电和6.2kW的直流电。英国风能联合会（BWEA）对11m/s风速下的设定功率是4.2kW（交流）和3kW（直流）。这样的输出根据所在地的风量，每年产生5000～11000kW·h的电能。叶片螺旋桨式的空气动力学设计可以实现平滑、安静的运行效果。

由于转子垂直轴的几何形状，所以叶尖接近转轴并且旋转时经过的距离较短，叶尖转速度较低，可大大减少噪声。

更小的垂直轴风力机适合于城市运行，因为那里需要安静无振动的运行环境。城市里风速和风向不断变化并且因为建筑物和其他物体阻挡的缘故使得风速更低。垂直轴风力机能在低风速下产生电压，它们不用改变方向来捕捉到可利用的风能。在城市使用垂直轴风力机的另一个优势是它们的造型比较美观，叶片会被喷漆或装扮来与周围的环境一致，例如建筑物的颜色。

垂直轴风力机也有别的优点。因为无论任何风向下都能获取风能，所以不需要任何偏航控制。齿轮箱以及发电机安放在地面，不需要爬塔架去维护它们。事实上，这类风力机或许根本不需要塔架，或者仅需要比水平轴风力机低得多的塔架或基座。

垂直轴风力机的缺点是不能自起动，所以需要一个发电机使它们起转，这意味着需要备用电池，或者连接在电网上获得启动能量。垂直轴风力机没有水平轴风力机效率高，并且低空的风没有水平轴风力机在高空捕捉到的风那么强劲和持续，所

以最终导致垂直轴风力机发出 1kW · h 电能的成本更高。此外，大部分垂直轴风力机需要钢缆线来固定，如果被安装在小的居民区或农场这就存在一定问题，可能会发生人被绊倒或者农用设备搅住的危险。

3.4　水平轴风力机

水平轴风力机具有主轴和发电机，二者位于在塔架顶部或接近顶部的机舱内。图 3-15 所示为一个小的民用型水平轴风力机。图 3-16 为两台风力机装置，每台单机容量为 2MW，它们的电能输出送入公用电网。图 3-17 所示为一个大的商用风力机，大概生产 80 ~ 100kW 的电能。

图 3-15　小型民用水平轴风力机

图 3-16　大型并网水平轴风力机
（图片来源：Vestas 风电公司）

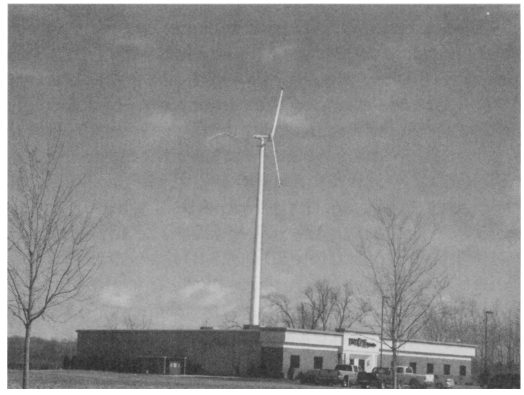


图 3-17　商用水平轴风力机

图 3-18 所示为一个大型的水平轴风力机的基本组成部分。风力机叶片有三个，根据箭头指示的风向这是一个上风式水平轴风力机，叶片被固定在转子上并且它具有可变的节距角控制使得风力机叶片节距角被调整实现最大的风电能量转换。这类风力机还有一个制动装置在不安全情况或维修时使叶片停转，当进行制动时，叶片必须被旋转到制动位置，这样风就不会使它们旋转。

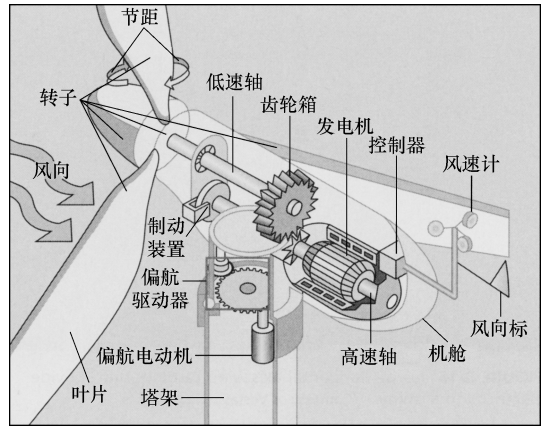


图 3-18　大型水平轴风力机的基本组成部分
（图片来源：美国能源部）

风力机叶片和转子被固定在低速轴的前端，低速轴后方连接有主齿轮箱，发电机被安装在齿轮箱输出的高速轴上，意味着当风使叶片旋转，能量从低速转轴传到齿轮箱上，通过变速箱和高速转轴传到发电机上。计算机或 PLC 实现对叶片节距角、偏航位置和发电机负荷的控制。风速计测量风速，风向标测量风向，信息被送到控制器来决定风力机的偏航方位和进行必要的节距角调整，从而获取最大的风能。所有的上述部件放在机舱中，后者为发电机和齿轮箱提供了保护作用。

偏航机构位于机舱下方，由偏航驱动器（即一个大的齿轮）和偏航电动机（有一个齿轮固定在转轴上，转轴套进更大的偏航齿轮）组成。偏航系统的齿轮传动比使电动机有足够的能量和转矩旋转机舱使叶片对风。偏航机构的这些部件安装在塔架上，塔架一般有 40 ~ 100m（约 130 ~ 328ft）高，塔架越高，获取的风能越多。今天，绝大部分大型风电机组的塔架有 65 ~ 100m 高，最近在德国，已经安装了 138m（453ft）高的塔架，可以获取更多的风能。

水平轴风力机使用齿轮箱或齿轮装置实现风轮转速和发电机转速的匹配，保证发电机产生精确的 60Hz 交流电压。控制发电机输出电压频率恒为 60Hz 存在以下几种方法。

一个是控制发电机转速，使发电机以能产生 60Hz 电压的精确转速旋转，这通过调整叶片节距角使叶片速度上升或下降来控制高速轴的转速。对一些大型风力机来说，叶片旋转速度为 10 ~ 22r/min，可以通过合适的齿轮传动比使高速轴转速提高为 1800r/min，这个速度可使发电机产生 60Hz 电压。

另一个控制发电机的输出频率的方法是使用双馈感应发电机，通过变频器控制交流励磁电流使得输出为 60Hz。这类发电机的励磁电流来自电网，频率是 60Hz，当励磁电流控制为 60Hz 时，发电机输出也为 60Hz。

还有一种方法是发电机运行任意转速下，当发电机任意转速旋转时产生的电压

频率可变，输出电压被送到变频器（电力电子频率变换器），变频器接收任意频率的单相或三相交流电压，利用整流器把交流电压变为直流电压，在直流回路里通过电容或电感滤波，最后将直流电压逆变为 60Hz 单相或三相电压。如果电压需要升高，使用变压器。有时一些设备会使用变频器回路里的直流电压，所以在此处，直流电压被直接利用而不是送到变频器输出交流电压。

3.5　叶片的几何设计

叶片的设计必须满足在低于和高于额定风速下获得电能的要求，其几何形状要使风力机在任意风速下获得的风能最大化。风力机叶片的设计最重要依据是风速及其持续时间。风速会根据风力机安装位置的不同而不同，例如沿着海岸线，风力较大且持续时间较长，而中西部的平原地区只有低速风可利用，所以叶片几何形状会根据实际情况的不同而不同。叶片的另一个方面是叶片数量，叶片的数量、大小和几何形状决定了在给定风力机安装点风力机能够产生的电量。

Energy Unlimited 公司已经生产了可变长度的风力机叶片，这些叶片的主要特征是它们具有一个能随着风自动伸长或收缩的尖端，这个设计使叶片随着风速自动改变长度。它利用离心力和装置使叶片伸长，导致在弱风下更高的能量获取；它也能使叶片尖端缩短，减小在强风中的机械负载。这项技术创新，使得产量增加了 25%。

3.6　叶片的数量

风力机可有一个、两个、三个或更多的叶片。小的居民用风电装置是考虑到节约成本和家庭的电力负荷而设计的。商业发电的风力机是双叶片或三叶片，为更大的电力负荷而设计。大部分商业发电的水平轴风力机采用三叶片。

大型水平轴风力机中一定数量的叶片需要改变叶片节距角和风力机朝向来保证在现有风速下获得最大能量，叶片的节距角和风力机朝向通常由计算机或 PLC 控制，风速计测出风速和风向，然后把这些信息送到计算机来实现控制。这些信息同样被用来确定最小和最大的风速，在风超过了最大设计标准时防止对风力机叶片或发电机造成损害。计算机除了测量叶片速度也测量发电机输出功率，并且根据不同的情况使得叶片更快地朝向或背离风向。一些大的风力机使用一系列的偏航齿轮使得偏航电动机在强风中旋转机舱，偏航电动机可使风力机机舱旋转 360°。在偏航控制中设计了保护系统来限制叶片转过的总转数到五转或更少。旋转计数器用来限制总转数，并且在达到最大转数后使风力机改变旋转方向，避免线缆不会被缠绕。

3.6.1　三叶片风力机

现代风力机大部分都是三叶片形式，而且风轮多为上风式，这些风力机通过偏航电动机保证风力机叶片正对风向。

图 3-19 为一台三叶片风力机。在噪声和振动限制情况下，三叶片风力机的转换效率最高。与双叶片和单叶片相比，三叶片风力机有更多的叶片用来将风能转化为电能。

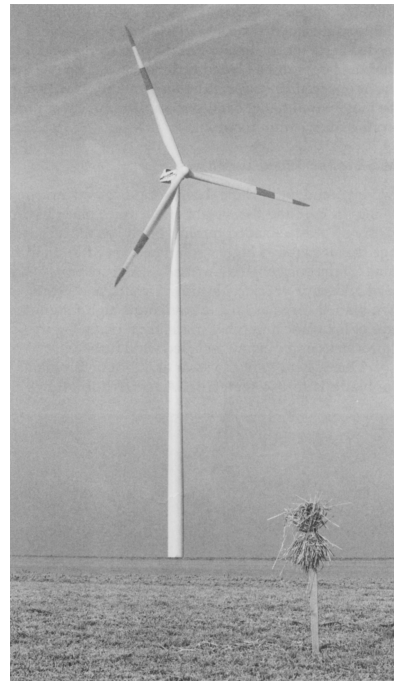


图 3-19　三叶片风力机（图片来源：维斯塔斯风力发电系统）

与单叶片和双叶片风力机相比，三叶片风力机的主要缺点是叶片重量大，不利于运输和吊起安装。图 3-20 是运输中的大型风力机叶片。从图中可知，为了运输一个叶片，需要一个大卡车和一个拖车。同时为了安装塔架和风力机，需要一台或多台大型起重机。为了稳固安装体型庞大的三叶片风力机，塔架必须更大更坚固。风力越大，风力机能捕获并转化为电能的风能就越多，同时这也就要求风力机塔架能够抵御风力的冲击。

3.6.2　双叶片风力机

与三叶片风力机相比，双叶片风力机的优点是成本低、单个叶片更轻，缺点是获得和三叶片风力机相同电能输出时需要的叶片转速更高。这一缺点主要体现在关键轴承、连杆以及齿轮箱的噪声和磨损。因此双叶片风力机叶片和其他机械部件的疲劳度更高。图 3-21 为双叶片风力机。

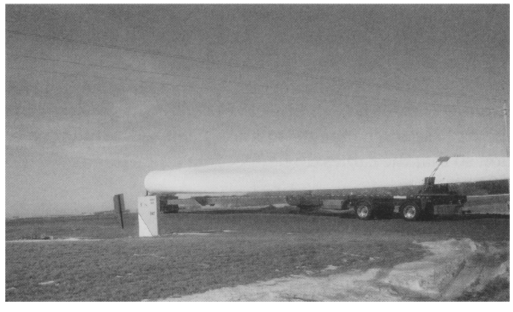


图 3-20　运输中的大型风力机叶片（图片来源：John Fellhauer，jfellhauer@ surenergy. us）

图 3-21　典型的双叶片风力机（图片来源：西南风电）

一种解决叶片磨损和疲劳问题的方法是使用摆动轮毂（teetering）。一个摆动轮毂允许叶片在其安装轴承上做内外柔性摆动。这种摆动很像小孩玩的跷跷板，前后移动，这样就使叶片的移动是柔性的，而不是刚性的。因此减小了磨损和疲劳，进而防止叶片及其他部件的损害。图 3-22 为摆动轮毂的运行状况。图 3-22a 为叶片和轮毂成 90°。图 3-22b 为轮毂发生摆动（转移和变化），从而叶片顶部弯曲进

了轴承侧。图 3-22c 为轮毂摆动，叶片弯曲偏向轴承外侧。这样的结构允许叶片在高风速时向轴承侧弯曲，从而减小了疲劳和磨损。这种摆动也防止了两叶片旋转过塔架时对风力机的冲击。这种摆动被限制在一个很小的幅度内（接近 ±2°），但这已经足够来限制高叶尖速比的双叶片风力机的磨损和疲劳了。

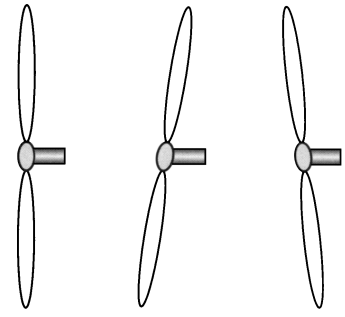


图 3-22　安装轮毂上的风力机双叶片
a）叶片垂直于风力机轴
b）叶片向轴侧弯曲
c）叶片向轴外侧弯曲

另一个提高双叶片风力机转化效率的方法是将叶片加厚加宽，这样两个叶片就可以转换更多的能量。较厚的叶片意味着叶片更加结实而且抗疲劳能力更强。叶片疲劳也是困扰早期双叶片风力机的问题。新型复合材料密度更小，因此在增加叶片体积的同时并不会使叶片的重量增加很多，使得叶片的生产成本更低。即使没有这些新材料的应用，双叶片风力机仍旧比三叶片风力机要轻很多。

此外，双叶片风力机比三叶片风力机更易安装。双叶片风力机的叶片能够在地面完成叶片安装后和机舱一同吊升至安装位置，安装更加快速、安全。

3.6.3　单叶片风力机

单叶片风力机仅应用于一些特定的场合，很少应用于水平轴风力机。为了使旋转平滑，单叶片风力机必须有一或两个平衡部件。图 3-23 为单平衡部件的单叶片风力机。图 3-24 为有两个平衡部件的单叶片风力机。单叶片风力机主要的优点是由于叶片减少而使得成本降低。与叶片大小相同的双叶片和三叶片风力机相比，要转化相同能量，单叶片风力机需要更快的旋转速度，所以叶片和齿轮的磨损和疲劳将更加严重，意味着在风力机的运行期间需要更高的维护保养费用。单叶片风力机也需要一系列的安装程序，从而保证叶片安装精确和平衡以限制摇摆和振动。摆动轮毂也常常应用单叶片风力机中。

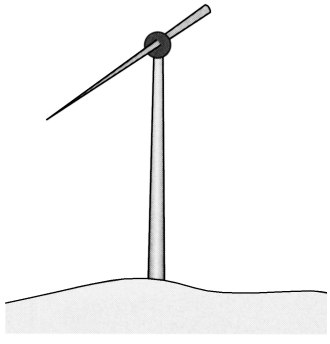


图 3-23　单平衡部件单叶片水平轴风力机

图 3-24　两个平衡部件的单叶片水平轴风力机（图片来源：Powerhouse Wind Ltd，www. powerhouse. co. nz）

双叶片和三叶片风力机重量大，只能使用大型的起重机来吊起安装，因此在只能使用小型起重机的场合更适合安装单叶片风力机。

3.6.4　五叶片风力机

为了生产更多的电能，一些风力机采用五叶片形式。图 3-25 为五叶片风力机，图中风力机的叶片较大。因为有五个叶片，所以与同样叶片大小的三叶片风力机相比，相同风况时，五叶片风力发电机将能够发出更多的电能。这种类型的五叶片风力机需要一个非常结实的底座和塔架来保持风力机稳固不倒，图中塔架及其底座安装在经过混凝土加固的建筑物顶部。另一个需要注意的是叶片的整流罩，它可以帮助叶片正对风向。

图 3-25　五叶片风力机

3.7　叶片类型比较

风力机叶片可以通过多种方式比较，例如大小、重量、材质和生产方式。不同叶片数量的风力机特点已经进行了分析比较。叶片可以由很多材料做成，例如用于小型叶片的木头、小中型叶片的铝合金、大型叶片的合成材料（塑料和玻璃纤维）。一些类型的小叶片由玻璃纤维增强聚酯或木环氧树脂做成。

风力机叶片必须设计的具备足够刚度来防止叶片尖端在强风中吹向塔架，但同时要足够灵活地把风能转换为电能。叶片安装在距离塔架上方有一定距离的转子主轴处，使叶片不会在旋转中接触到塔架的任何部分。

大部分叶片是由一个空心的玻璃纤维或者在中心使用其他材料构成使叶片更加坚硬。一个 50ft 长的玻璃纤维叶片大约重 2500lb，有些类型的叶片由使用真空渗透方法的玻璃纤维合成材料构成，这一尖端科技使得叶片更轻更强韧。

风力机叶片的大小不一，有非常小的叶片，如图 3-26 所示的民用型风力机的长度小于 24ft 的叶片，也有非常大的叶片，如图 3-27 所示必须用大的卡车和有轨电车运输的叶片。

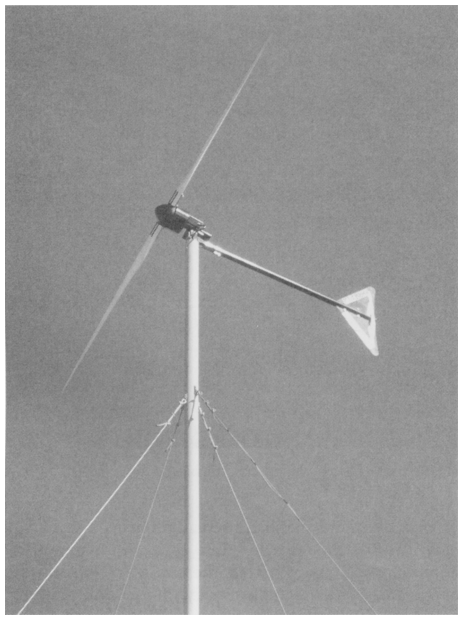


图 3-26　应用于居民区的小叶片风力机（图片来源：西南风电）

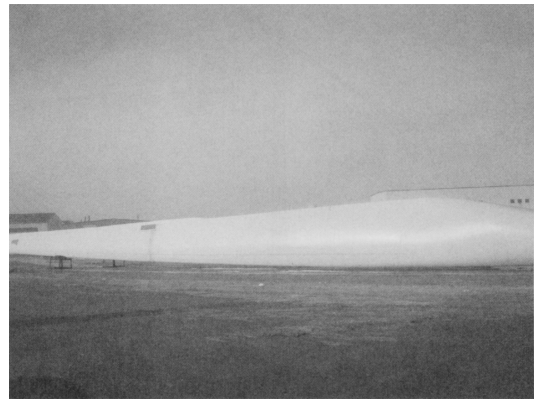


图 3-27　超大型风力机的大型叶片（图片来源：John Fellhauer，jfellhauer@ surenergy. us）

3.8　单叶片、双叶片和三叶片风力机的优缺点

单叶片、双叶片和三叶片风力机的比较见表 3-1。

表 3-1　单叶片、双叶片和三叶片风力机优缺点

风力机类型	优　　点	缺　　点
三叶片风力机	1. 噪声最小 2. 振动最小 3. 叶片通过节距角控制可以进行最大风能追踪 4. 塔架高度更高可以捕捉更多的风能 5. 美观 6. 最小的能量损耗	1. 重于其他两种风力机 2. 价格高于其他两种风力机 3. 需要主动偏航控制才能使叶片对风 4. 需要最大型的起重机进行安装 5. 需要最大和最重的塔架 6. 叶片过大难于运输
双叶片风力机	1. 可随风速变化进行自动偏航控制 2. 相比单叶片风力机能够产生更多能量	1. 噪声大于三叶片风力机 2. 产生的能量小于三叶片风力机

（续）

风力机类型	优　点	缺　点
单叶片风力机	1. 最经济 2. 最轻 3. 最容易安装因为重量轻并且叶片能在地上安装 4. 塔架最小并且最轻	1. 噪声大于三叶片风力机 2. 必须最大转速运行从而产生相同的电能 3. 叶片振动最大 4. 不美观

简　答　题

1. 当风吹过风力机叶片时，升力是如何产生的？
2. 如何理解升力阻力比？
3. 为何双叶片水平轴风力机需要摇摆轮毂？
4. 叶尖速是什么？它为什么很重要？
5. 三叶片水平轴风力机的优缺点是什么？
6. 双叶片水平轴风力机的优缺点是什么？
7. 单叶片水平轴风力机的有缺点是什么？
8. 当风吹过水平轴风力机时如何使叶片旋转？
9. 当风吹过垂直轴风力机时如何使叶片旋转？
10. 垂直轴风力机的优、缺点是什么？

选　择　题

1. 风首先吹过机舱然后通过叶片的为（　　）。

a. 下风向水平轴风力机
b. 上风向水平轴风力机
c. 垂直轴风力机
d. 所有风力机

2. 当风吹过风力机叶片时，（　　）。

a. 风首先通过尾缘
b. 风首先通过前缘
c. 风可通过尾缘或前缘，取决于风向

3. 一个（　　）可以在风速为 20mile/h 时产生最大的电能。

a. 单叶片风力机

b. 双叶片风力机

c. 三叶片风力机

d. 同样大小的垂直轴风力机

4. 与其他类型同样大小的风力机相比，（　　）的价格是最高的。

a. 单叶片风力机

b. 双叶片风力机

c. 三叶片风力机

d. 取决于是上风机还是下风机

5. 无论什么风向，（　　）不需要偏航电动机来持续获取风能进行发电。

a. 上风水平轴风力机

b. 下风水平轴风力机

c. 垂直轴风力机

d. 上述所有

e. b 和 c

6. 与所有同类型风机相比，下面哪种风力机的叶片会在最小风速的情况下旋转？（　　）

a. 上风向垂直轴风力机

b. 下风向垂直轴风力机

c. 垂直轴风力机

d. 所有风力机的叶片都会在同样的风速下旋转

7. 垂直轴风力机的优点是（　　）。

a. 通常情况下比水平轴风力机价格低

b. 无论风向如何它们都能产生电能

c. 通常情况下比水平轴风力机噪声小

d. 上述所有

8. 哪种类型的风力机叶片需要平衡力？（　　）

a. 三叶片风力机

b. 双叶片风力机

c. 单叶片风力机

d. 非水平轴风力机

9. 风力机叶片产生升力是在下列哪种情况下？（　　）

a. 当风从叶片的前缘流动到尾缘

b. 当风从叶片的尾缘流动到前缘

c. 当叶片被设置为收起状态

d. 任何时间风流过风力机，无所谓风向

10. 当流过风力机叶片的风速增加时，(　　)。

a. 升力和阻力增加

b. 升力和阻力下降

c. 升力上升而阻力下降

d. 升力下降而阻力上升

第 4 章　风力机的性能

本章学习目标

读完本章后你将能够：

- 了解发电机转轴的恒定旋转速度对风力机的重要性。
- 理解风力机叶片在风中旋转的原理。
- 理解攻角对于风力机叶片的意义。
- 估算被转换为电能的风能大小。
- 使用功率曲线来确定风力机的最佳性能。

本章关键词

主动失速控制（Active stall control）
攻角（Angle of attack）
空气密度（Air density）
机翼（Airfoil）
放大器（Amplifier）
贝兹理论（Betz's law）
叶片节距（Blade pitch）
闭环控制（Closed-loop control）
误差（Error）
反馈传感器（Feedback sensor）
有限元分析（Finite-element analysis）
升力（Lift）
输出（Output）
被动节距控制（Passive pitch control）
被动失速控制（Passive stall control）
最佳性能（Peak performance）
节距控制（Pitch control）
功率曲线（Power curve）
监控与数据采集系统（SCADA）
设定值（Setpoint）
加法器（Summing junction）
紊流（Turbulence）
风力机最佳性能（Wind turbine peak performance）
偏航控制（Yaw control）

本章概述

本章研究风力机的工作性能以及影响风力机运行的因素，解释风力机叶片如何能像机翼一样在风中旋转，以及如何通过改变攻角影响风力机的效率，还会介绍如何控制风力机使它们的性能最优，使得在给定风速下产生最多电能。本章也会对如何检测风力机以保持风力机达到最佳运行状态做出说明。

4.1　恒速运行

在大型风力机中，恒速运行对于保证发电机产生的电压频率尽可能接近 60Hz 是

很必要的，因为发电机转轴旋转速度决定了电压的频率。通常情况下，叶片和转子的速度为 10～20r/min，在这类风力机中，使用齿轮箱增加输出转轴的速度并把能量传递到发电机，输出转速被控制在大约 1800r/min，这样能保证输出电压频率为 60Hz。

风速变化时，转子和叶片速度也会变化，齿轮箱持续改变传动比保证输出转速接近 1800r/min，这对保持发电机输出电压频率是很重要的。

对于不与电网相连或不直接输出交流电压的小型风力机，输出电压的频率不是问题。这类风力机的输出电压直接转化为直流电压，然后存储在蓄电池里或者再通过变频器输出 60Hz 的交流电压，这类风力机的转子和叶片能以任意速度旋转。在后面的章节中将学习更多关于逆变器和存储设备的知识。

4.2 风力机叶片的转动原理

本书第 3 章学习了风力机叶片的设计，叶片相当于机翼一样，能够在风吹过其表面的时候产生升力。叶片在升力的作用下开始随风旋转，从而带动整个风轮旋转。风吹得越快，叶片旋转越快，叶尖线速度也越高。

4.3 攻角和叶片节距角

风向与叶片水平面之间的角度称为攻角，而叶片相对于风力机的位置称为节距。一些风力机中叶片的节距角可在 0°～90°之间调整，当调整节距角使风直接吹过水平叶片时攻角为 0°。当改变叶片节距角使得叶片的前沿向上旋转，升力和攻角都增加。当节距角增加以至于叶片旋转至能产生最大升力时对应的攻角称为临界攻角，当攻角增至临界攻角后再增大时，风力机失速并且失去转换风能的能力。当叶片节距角改变时，风力机会产生更多或更少的升力，类似地，攻角也有这样的变化规律。

通过控制叶片节距角可以改变叶片的攻角，当攻角改变时，即使在相同的风速下叶片旋转速度也会发生变化，使得风力机产生的电能可以被控制。通过改变攻角，可以使风力机在最低的风速下产生电能，或者在整个运转过程中保持较高的风力机效率。

4.4 叶片节距控制

风力机必须在可变的风速条件下运行，很重要的是叶片要具备节距控制功能使得风力机通过调整节距角运行在最优的情况下。节距控制最主要的功能就是转子以保证发电机产生合适的电压和频率的特定速度旋转。发电机转速决定了输出交流电压的频率，美国的交流电频率是 60Hz。叶片连接在转子上，转子通过转轴连在齿

轮箱上，后者输出转轴连在发电机上。当风吹动风力机叶片，就会驱动叶片和转子旋转，风力机叶片的转速通常为 10 ~ 20r/min。而由齿轮箱输出轴驱动的发电机以大约 1800r/min 的速度旋转才能产生 60Hz 的电压。如果风速改变，可以改变节距角使转子加速或减速保证发电机尽可能以 1800r/min 的转速旋转，使发电机的输出频率接近 60Hz。

如果风速过大，可以通过调整节距角使得叶片不会被高风速所导致的超速旋转损坏。节距控制同样可在强风中减少叶片和塔架的负担。本章解释了节距控制的原理，以及被动节距控制、主动节距控制和最新的控制方式。

在风速很低的时候，可以通过节距控制调整叶片方位来尽可能多地获取风能，即可以通过调整叶片实现最大风能追踪。

4.4.1　风力机的最佳风速

节距控制依赖于风力机的类型和大小，节距控制很重要，其中一个原因是风速过大的时候可能会损坏叶片、转子、齿轮箱和发电机。对于大部分风力机来说，输出最大能量的最佳风速是 15m/s（33mile/h），当风速超过最大限制时，叶片和转子旋转过快会损坏机械装置。

4.4.2　叶片的节距控制

当节距角变化时，叶片迎风面就会发生变化，图 4-1 所示为三种不同位置的叶片节距。图 4-1a 中叶片是全节距并且叶片保持完整的迎风面，此时它能获取可利用的最大风能；图 4-1b 中叶片是半节距，叶片面部分迎风，此时叶片能获取可利用风能的 50%；图 4-1c 中是 1/4 节距，叶片只能获取一小部分风能。随着叶片节距变化，当迎风面逐渐变小时，叶片获取的风能越来越少，叶片减慢旋转速度从而使风力机运行在安全区域内。

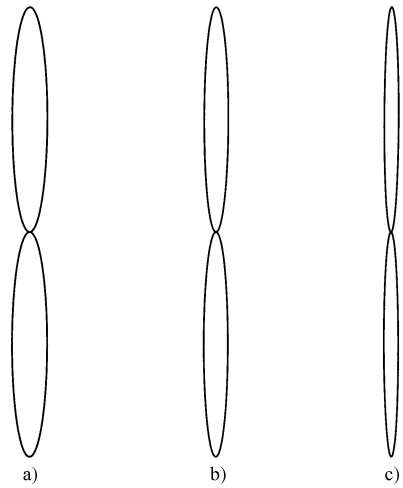


图 4-1　叶片节距

a）全节距　b）半节距　c）1/4 节距

4.4.3　闭环节距控制

风力机叶片节距调节是通过闭环控制实现的，其输出被反馈用以改变叶片驱动设备的液压油压力大小及流向。图 4-2 所示为一个闭环控制回路，设定值是风力机最大旋转速度，反馈传感器测叶片和转子的速度。设定值和反馈信号在加法器中进行比较，误差被送到可编程序控制器（PLC），PLC 发出信号到液压放大器，改变控制节距角的液压油压力和流量。放大器将弱电信号变为可以驱动液压阀的强电信号。PLC 通过快速的 PID 算法改变输出信号，PID 控制可以快到每秒钟内实现多次运算，也可以慢到在风轮每一转中只实现一或两次运算。PID 参数调整需要根据风力机类型及特定应用而定。

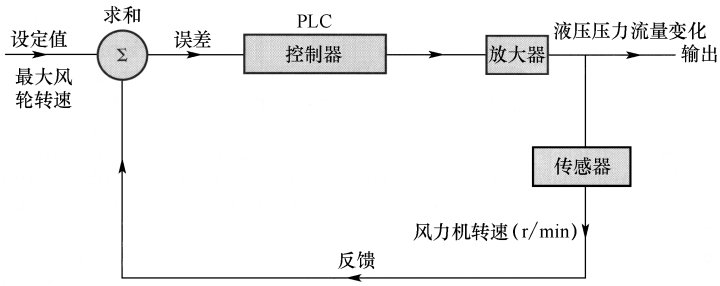


图 4-2　叶片节距角闭环控制系统

反馈传感器检测风力机转速，如果转子速度超过设定值，误差变负。PLC 控制器输出信号至液压放大器改变节距角，使得叶片减速，转子速度会降到安全运行范围。如果风速降低，风力机转速会变得很慢，反馈信号会指示速度减慢并通过加法器产生一个正误差信号，PLC 调整液压放大器对节距角做出反向调整，使风力机加速并获取最大的风能。节距角的这种变动趋势持续到风速再一次使转子和叶片过速。这种闭环控制使得叶片节距角得到实时调整来获取最大的风能，直到转子的旋转速度超过安全速度。这种控制每一次可将节距角改变 0.5° ~ 1°，也可以增大节距角调整步长，如一次改变 2° ~ 3°。当误差改变时，PID 控制能计算出控制结果并相应地调整液压放大器。

闭环控制也可以用其他类型传感器检测叶片或塔架上最大转矩的变化情况，并通过调整节距角减小叶片或塔架应力。对一些大型风力机，节距控制可与偏航控制结合起来调整叶片和塔架所承受的压力，或者保护传动链和发电机不受损坏，确保风力机运行安全。风力机偏航是指机舱及风轮相对于风向的方位，偏航控制能根据情况改变风力机机舱和风轮的迎向角度：当风速中等或偏低时使风力机叶片对风，在风速太大的情况下移动机舱位置使叶片偏离风向。

4.4.4　叶片调整的动力

改变叶片节距角的动力来自液压油或机械系统。大型风力机一般使用液压系统改变叶片节距角。有些类型的系统中叶片底部安装有液压缸，当液压缸伸开时，叶片节距被调整到最小位置；当液压缸收缩时，叶片节距被调整到最大位置。基于比例控制，PLC 控制系统通过液压放大器精确地调整液压缸伸缩位置，实现节距角调整。在性能最好的系统中，液压缸调整精度能够实现 0.1°节距角控制。

在小型风力机中，叶片节距角通过基于强力弹簧的机械系统调整。当风速达到最大时，叶片节距角发生变化，弹簧张力会改变叶片节距角使风力机减速。还有一些系统通过对叶片进行特殊设计使得风力机遇到强风时进入失速状态，减少叶片从风中获取能量的大小，这类控制在随后的被动失速控制和主动失速控制部分详细讨论。

4.4.5　被动失速控制

被动节距控制也被称为被动失速控制，这类控制通过叶片的设计使风力机在强风中减速。该类型风力机的叶片以一个固定的角度安装在轮毂上，在这个安装角度下当风速过大时，叶片形成的迎风面可以使得叶片不再获取能量。当风速超出安全范围时，这个角度将使叶片停止产生转矩，使得转子速度降到安全水平。叶片必须采用特定设计使得在高风速下能产生减小叶片升力、降低叶片转速的紊流。其实无论风是变向的还是直线吹送的，紊流都会发生。当风速逐渐增加时，紊流就会慢慢形成，并将作用于叶片持续地影响转子速度。

这类控制之所以称为被动控制，是因为没有容易失效的运动部件以及昂贵的控制系统，但是会使得风力机整体运行效率下降。

4.4.6　主动失速控制

另一种控制叶片节距角的方法是主动失速控制。在这类控制中，叶片节距角变到使风力机发生失速的一个值上，此时叶片不再捕获任何使转子旋转的能量。主动失速控制也需要调整叶片节距角，但是其目标是使叶片和转子得到控制并且在必要时停转，这类控制使得紧急状态下风力机控制更为容易。主动控制的优势是它同时也可以用于风力机起动或者低风速情况下提高风力机效率，与没有节距控制的情况相比，主动控制允许风力机在很低的风速下开始旋转。

这些控制将在本书第 5 章进行更深入地探讨，在该章将会介绍更多关于转子速度控制、偏航控制、节距控制以及液压控制系统的相关知识。

4.4.7　叶片独立节距控制

叶片独立节距控制是一种最新的节距控制方法。多叶片大型风力机中需要叶片节距角得到独立控制，在转子的每一次旋转周期中，PLC 控制和传感器能使每一个叶片被调整多次，这样一方面使得风力机在各种风速下效率最大化，另一方面使风力机不在强风中受损。

这种独立控制在叶片旋转时使每一个叶片的节距角单独发生轻微改变，意味着一个叶片的节距角相比其他叶片可以多调或少调 2° ~ 3°，即意味着在每一个旋转周期中，每个叶片都被单独调整使得在给定风速下风力机整体效率最高。

当风速较高且多变，或者当风场风速轻微发生变化时这种控制十分有用，因为每个叶片会随着风速变化进行调整，使得风力机保持最高效率。最新型的传感器、PLC 控制、以及比例液压系统为最先进的叶片独立节距控制提供了有效的实现方法，同时也大大提高了这类控制的成本，但是大型风力机效率的 1% 或 2% 的提高就会弥补这种代价。

4.5　变风速情况下风力机的运行

当工程师设计风力机时必须考虑产生的电能的用途，如果用在小型居民区或商

业场所，则可以采用不需考虑频率控制的小型风力机。用于电热、烧水和照明的电能可用直流电，不需要特定的频率。如果负载需要 60Hz 的交流电，可用变频器来转换直流电压或者非 60Hz 交流电压。这些小型风力机装置可安放在风速多变的地方，在风速从低速到接近 35mile/h 速度的范围内，这种装置不必考虑风速改变的影响而能产生所需要的电能。

当用中型风力机为大的商业负荷例如商业场所供电时，则需要变频器把任意风速下产生的电能变为 60Hz，所采用的电力变频器容量必须大于最大用电负荷。

用来为电网提供精确的 60Hz 电能的大型风力机必须有齿轮箱或传动链之类的装置，通过它们可以把叶片和转子较低的转速变换到发电机运行所需的 1800r/min。

最大容量的风力机可能会用到节距角和偏航控制器，利用液压控制来调整叶片节距角和偏航，保证风力机叶片和齿轮箱能为发电机提供 1800r/min 的转速。这些大型控制系统使风力机在较宽的风速变化范围内，例如从比较低的 7 ~ 10mile/h 低风速一直到 35mile/h 高风速的区间内获取风能。通过改变节距角和偏航方向保证叶片和转子转速在能够让发电机发出 60Hz 电能的合理范围内。

一些容量非常小的风力机具有能使机舱随风速和风向变动的尾翼，这些小风力机在风速大约为 7 ~ 10mile/h 时就能够开始发电。当风力机叶片在最低风速下旋转时发的电量最小，随着风速达到 15 ~ 35mile/h，风力机开始产生稳定的电能。当风速超过 35mile/h 后，风力机的控制系统使叶片减速或者完全停转来保证其不被损坏。

4.6 发电量估测

若想计算出多少能量从风能转换而来，必须遵循最基本的物理定律：一个是能量不会被创造也不会消失，它只会从一种形式转换为另一种形式；另一个就是不存在没有损耗的机器，意味着风力机叶片只能把一部分风能转为电能。风的能量是一种动能，它存在于运动的物质中并且可以被转换。当叶片开始旋转并且使发电机旋转时，风能被转换成了机械能，而后机械能可以进一步被转换为电能。转换得到的电能可以通过变换器和输电线路进行转换和传输，最后用于可通过开关闭合控制的电力负荷，例如加热、照明以及驱动风扇、空调器和电冰箱的电动机。风力机不能转换所有的风能，因为有一些风能会在通过叶片时流失。

为了计算任意给定风速下的可用电能，须从功率的定义开始讨论。功率是单位时间内做的功，功率有不同的单位，例如用于电能的“瓦特”或者用于机械能的“马力”，电能与机械能可以相互转换，例如 1hp 相当于 33000lbf · ft/min（英尺磅力/分钟），也相当于 746W 的电功率。

根据风速、叶片大小、空气密度，给定风速下风力机捕获的风能可以用下式表示：

$$\text{风能} = (\text{片直径})^2 \times (\text{风速})^3 \times (\text{空气密度}) \times (\text{风力机常数})$$

对于多叶片风力机，则需要增加一个或多个来确定叶片扫风面积的常数，以及实现变量单位的转换，用符号表示上式：

$$P_w = D^2 V_w^3 d_a K$$

式中，P_w为功率；D 为风轮直径；V_w为风速；d_a为空气密度；K 为包括叶片数量在内的常数。

在这个公式里，风速的三次方意味着如果风速加倍，那么转换的能量将增加为 8 倍；叶片直径的二次方同样意味着如果叶片直径加倍，则风能增加为 4 倍。这就是为什么要设计越来越大的叶片并且把风力机安装在风速可以保持在最大值（33mile/h）左右的地方。当这些快速流动的风吹过塔架和叶片时，风力机的输出功率可以达到兆瓦级，并且风力机要能够承受高风速引起的磨损和应力。

小型风力机效率较低，是因为它们的叶片和塔架较小，并且被安装在风力较小或者风速波动的地方。尽管风力机效率不高，但是设计师们可以通过加大这些风力机的外形以保证它们能够发出需要的电能。

4.6.1　贝兹理论和风力机能量转换效率

在讨论风力机能量转换时，需了解德国物理学家 Alber Betz 的研究成果。1919 年，Betz 得到如下结论：理想情况下风力机所能转换的风能极限效率为 59%。如果要得到超过 59% 的转换效率，则需要在风中获取更多的能量，但此时风基本上不可能有足够维持其继续流动的能量。如果这种情况发生，风在叶片附近的某个区域将会停止吹动，从而形成一个平静的区域。简而言之，当风力机的效率在 59% 左右并且保证风有能够维持其继续流动的能量时，叶片转换的风能最大。这个结论被称为贝兹理论。

4.6.2　齿轮箱和发电机的效率

另一个决定风力机效率的因素是机械系统的效率，包括转子、齿轮箱、转轴和发电机。上述每一个元件都存在影响效率的机械损耗。同时计及叶片的风能转换效率，风力机整体的效率就会下降。风力机整体效率的提升可以通过使每一部分运行更加高效来实现，在 2MW 及以上功率的大型系统中，小幅度的效率提高就会使所产生的能量有非常可观的增加。

4.7　风力机测试

当风力机设计好后，必须经过测试来验证它能在每个给定风速下正常发电，必须确定和验证将会出现在风力机数据手册内的切入风速。风力机的一些组成部件如叶片、转子、齿轮箱和发电机可在实验室分别测试，这就使得工程师和技术人员在构成完整系统前就能确定单个部件的效率。

可将发电机连接在测力计或负荷箱上测试其输出功率，当在输出负荷可调的现

实条件下，就能测试出发电机的能量转换效率。测力计的负荷可以设计为一个恒定值并运行一段时间，或者增加或降低负荷来显示负荷变化的影响。

4.7.1 使用 FEA 测试叶片

现在，可以利用计算机程序对叶片复杂的设计过程进行分析得出风能捕获效率，这类程序也可确定风力机的薄弱点，或仿真导致叶片损坏的故障。计算机程序通过增、减负荷对叶片施加特定的力和转矩，测试变风速情况下的叶片响应特性。同时也可以通过改变叶片的设计来对比叶片效率和寻找薄弱点。

这种计算机程序应用了称为有限元分析（FEA）的技术，并且有复杂的数学算法来确保准确性。FEA 程序已经越来越精确并且使测试过程越来越可靠，当与风场的实际数据相结合时，FEA 会容易地预测出小型风力机的效率。

4.7.2 基于 SCADA 实际运行数据的预测校验

利用监控与数据采集（SCADA）系统可以收集任何运行的风力机的一系列数据，例如风速、风向、发电量等信息。当这些数据长时间汇集并且存储在计算机数据库中，可对其进行分析以发展更准确的预测技术。

这种预测风力机效率的方法很准确，尤其是很多风力机安装在一个风场的时候，SCADA 使得风力机效率预测和计算变得越来越准确。

4.8 风力机的紊流问题

紊流可简单地定义为不按直线流动的风，也可认为是旋风。当它流过叶片时，不会产生与直线风相同的能量。风紊流可以由建筑物、树木和其他在风流方向上的阻碍物引起，紊流可以是自然发生的，也可能是受人为的物体或建筑物影响发生。

紊流的大小会随时间或区域而改变，例如树木枝繁叶茂的时候或者树叶落尽的时候。有些类型的紊流变化随着季节的变化而变化，因为季节变化会导致风向改变。在一个特定地方要尽可能辨识出所有类型的紊流，然后决定在这个地方是否适合安装风力机。

另一种紊流也可能由风流过叶片驱动其旋转的风力机自身引起。如果风力机安装在房屋或建筑物附近，紊流会对附近的设施产生噪声和振动。如果噪声很大，对人产生难以忍受的影响的时候，就不得不对风力机做出调整或者把风力机移走。

当很多风力机安装在一起时，紊流的影响将会被放大并成为一个大问题。由一台风力机引起的紊流会流过其他相邻风力机并对其效率造成影响。尤其是风力机装机数量超过百台的大型风场，紊流的影响将会非常明显。

通过对风力机叶片做出新的设计和测试能发现并限制这些紊流的影响，这些设计上的改进使得紊流对叶片的影响最小化。这些变化也许会使风力机效率降低，但是却改善了风力机给环境带来的紊流影响和噪声污染。

4.9　如何确定风力机的最佳性能

有几个方法可以来衡量风力机的最佳性能。一种方法是使用风力机的功率曲线图，功率曲线图描述风速在从零到最大值时风速与风力机输出功率的关系。图 4-3、图 4-4 分别以表和图的方式描述了风力机功率曲线。图中，底部横坐标为 2 ~ 21m/s 的风速（注意图中曲线所表示的风速增量为 3m/s），图左侧的纵坐标表示发电机的输出功率，范围为 0 ~ 70kW。根据所表示的功率曲线，当风速在 15 ~ 19m/s 之间时风力机最大功率输出为 63 ~ 65kW。

风力机功率 vs 风速		
风速/(m/s)	风速/(mile/h)	功率/kW
2	4.5	0
3	6.7	0
4	8.8	0.7
5	11.2	2.2
6	13.4	6.5
7	15.6	13.8
8	17.9	22.7
9	20.1	32.1
10	22.4	41.3
11	24.6	46.5
12	26.8	52.8
13	29.1	58.7
14	31.3	61.7
15	33.5	62.9
16	35.8	63.8
17	38	64.7
18	40.2	63.5
19	42.5	62.6
20	44.7	61.7
21	46.9	61.2

图 4-3　计算风力机功率曲线所需的风速和风力机功率数据

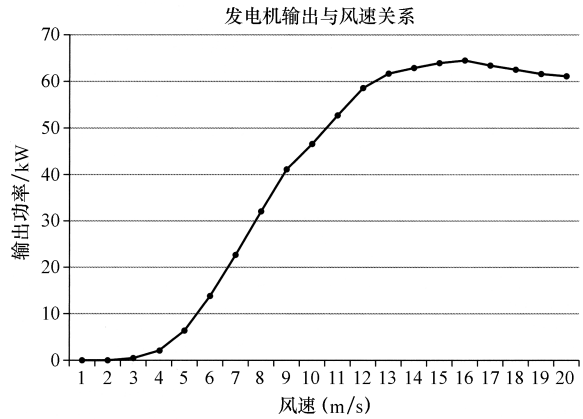


图 4-4 100kW 风力机功率曲线图

另一种确定风力机最佳性能的方法是考虑空气密度的影响。密度是每单位体积物质的质量，空气密度是每立方英尺的空气的质量。空气湿度、压力和温度对空气密度都有影响，当空气温度降低，压力增大；湿度增大时，空气密度增加。

当空气密度很大时，风力机输出增大。在一些性能测试中不考虑空气密度，而在另外一些测试中由于实验是在高空气密度的环境下进行的，所以风力机输出要比在稀薄空气中略高。

不同的风力机的功率曲线是不同的，很多影响输出的因素，包括风力机叶片直径和风力机安装高度。一旦确定了功率曲线，就会在风不断变化时很容易得知风力机总体输出特性。

4.9.1 功率曲线的商业应用

功率曲线显示了任意给定风速下的风力机输出功率。风力机最大输出功率的数值可用于风力机的市场销售以及与同类竞争产品的比较，所以有时候标注值要比实际高一些。一些生产厂家利用预测和计算方法来确定风力机功率曲线。如果在购置风力机时将功率曲线作为一个考虑因素，可以从几台已安装的风力机中获取实际的 SCADA 数据作为参考。

另外需要重点指出的是额定功率不是峰值功率。峰值功率是风力机在最高额定风速下的发电量，但是这个数没有价值，因为最高风速不可能持续存在。对于这种独特的负载情况，风力发电机和齿轮箱不一定工作在额定状态。在使用功率曲线计算风力机的投资回报时，需要用到的是平均风速，而不是运行中偶然遇到的最大风速。

4.9.2 基于独立实验室的测试

功率曲线除了由生产厂商给出外还需要由独立的实验室进行测试。美国能源部（DOE）的国家可再生能源实验室（NREL）就是可以进行这种测试的一个机构。如果数据是用来比较不同的风力机，那么对于所有机型应该采用相同的实验条件。

NREL 和美国国家航空航天局（NASA）等其他机构联合为风力机提供测试。NASA 有大量坐落在加州硅谷的 Moffet Field 的风洞，其中一个风洞是专门为风力机测试设计的，可以在可控状态下产生巨大的风流量。最初，风洞是用来检测运行状态下机翼和直升机的稳定性。风洞的主要设施是一个里面充满了压缩空气的大型圆顶物，这些空气被慢慢释放并通过一个安置风力机叶片和转子的隧道。被释放到隧道里的空气真实地模拟通常情况下风力机塔架顶部的风速。因为风力机装在隧道靠近地面的地方，因此可以轻易地与大量传感器相连从而生成大量的数据。Moffet Field 的风洞面积是 80ft × 120ft，可以产生用于测试风力机的低、中风速。通过这些测试得来的数据非常重要，因为它们是由一个完全独立于任何生产厂商的科学实验室收集的。

另一个独立测试中心是位于科罗拉多州的隶属于美国能源部的国家风电技术中心。该中心有着独特的装备，用来模拟研究和测试所需的最高至 31m/s 的风速。这些高风速模拟条件不仅可以测试真实情况下风力机最大输出，还可以检测一些在高风速下停止叶片的安全系统。

2008 年，NREL 开始检测输出功率小于 100kW 的小型风力机。因为大部分情况下，小公司乐于生产这种规模的风力机，而复杂的系统和较高的检测成本使这些公司一般很难从独立的机构获取数据。NREL 已经建立了完善的测试系统，可以比较不同风力机的数据。

4.9.3　发电机输出测试

确定风力机运行性能的另一个重要部分就是风力机效率的测试。发电机的输出随着发电机转速而改变（本书第 6 章将详细介绍），不同类型的风力机有不同的额定效率，可以调整一些发电机的励磁电流使其效率在一定的转速范围内保持恒定。

发电机的效率不断变化，所以即使风力机叶片能够获取最大的风能并转为机械能，但是如果发电机转速不是最佳值也会使风力机的整体效率低于额定值。因为这个原因，发电机真正的最佳输出也许仅会在几种风速的特殊条件下出现。

简　答　题

1. 什么是风速曲线，其用途是什么？
2. 为什么机械轴的恒定转速对风力机来说很重要？
3. 为什么风力机叶片的节距控制对大型风力机来说作用很大？
4. 什么是逆变器，为什么它能使风力机工作在任何风速下？
5. 对一个闭环控制系统来说，设定值、反馈和误差是什么？
6. 主动失速控制和被动失速控制的区别是什么？
7. 为什么一些小型风力机不需要转速控制？

8. 当空气密度变大时，它对风力机的影响是什么？
9. 根据贝兹理论，风力机的最高效率可达到59%，为什么？
10. 风力机的失速是指什么？

选 择 题

1. 决定风力机所发功率大小的三个因素为（　　）。
a. 风速、空气密度和风力机叶片直径
b. 风向、空气密度和风力机叶片直径
c. 风速、空气湿度和风力机叶片直径
2. 风力机叶片的攻角是什么？（　　）
a. 风力机叶片旋转的速度。
b. 风力机旋转速度除以风力机叶片数量。
c. 风向与叶片所成的角度。
3. 对一些风力机来说，为什么需要调整叶片的节距角？（　　）
a. 当风速过大时改变节距角可以使叶片减速。
b. 当风速过小时改变节距角可以使叶片捕捉更多风能。
c. 改变节距角可以使风力机任何时候都运行在最佳速度下。
4. SCADA是指（　　）。
a. 监控和数据采集
b. 设备中心和数据采集
c. 监控和数据应用
d. 上述所有
5. 影响风能大小的因素是什么？（　　）
a. 风速。
b. 风密度。
c. 风向。
d. 上述所有。
e. a和b。
6. 贝兹理论和风力机的能量转换效率表明：风力机可获取的最大风能是（　　）。
a. 大约50%
b. 大约59%
c. 大约75%
d. 大约99%
7. 风力机的主动失速和被动失速的区别是什么？（　　）

a. 主动失速控制利用叶片的设计达到失速状态，而被动失速控制则利用液压或机械系统改变节距角达到失速状态。

b. 主动失速控制利用液压或机械系统改变节距角，而被动失速控制利用叶片的设计实现失速状态。

c. 主动失速控制和被动失速控制都使用液压或机械系统达到失速状态。

8. 风速曲线是什么？（　　）

a. 风速曲线表明了风速与该风速下风力机所产生的功率之间的关系。

b. 风速曲线表明叶片的速度和在该速度下风力机输出功率。

c. 风速曲线表明在任意给定风速下叶片的转矩。

9. 对一些风力机来说为什么机械轴运转在特定的速度下很重要？（　　）

a. 风力机产生的电压必须是 60Hz。

b. 为了保证风力机运行在接近最佳状态。

c. 为了保持风力机承受不变的压力。

10. NREL 和 DOE 代表什么？（　　）

a. 国家电力实验室和美国能源部。

b. 国家可再生能源实验室和美国电力部。

c. 国家可再生能源实验室和美国能源部。

第 5 章　水平轴风力机的主要部件

本章学习目标

读完本章后你将能够：

- 区分水平轴风力机的基本组成部分。
- 描述可编程序控制器（PLC）的四个基本组成部分。
- 说明 PLC 输入模块的功能。
- 说明 PLC 输出模块的功能。
- 辨析液压系统的基本组成部分。
- 解释说明液压方向控制设备的运行原理。
- 解释潮流控制器的运行原理。
- 解释压力控制器的运行原理。
- 辨析风力机中采用的不同类型的制动器。
- 解释风力机的制动器的工作原理。
- 分辨闭环系统的各组成部分。

本章关键词

模拟控制（Analog control）
叶片节距（Blade pitch）
叶尖速（Blade tip speed）
插装阀（Cartridge valve）
单向阀（Check valve）
闭环（Closed loop）
方向控制（Direction control）
可擦写可编程只读存储器（EPROM）
误差（Error）
反馈（Feedback）
流量控制（Flow control）
液压控制（Hydraulic control）
液压伺服控制阀（Hydraulic servo control valve）
镜像寄存器（Image register）
输入模块（Input module）
梯形逻辑（Ladder logic）
负荷效率（Load efficiency）
开环（Open loop）
输出模块（Output module）
先导压力（Pilot pressure）
压力控制（Pressure control）
过程变量（Process variable，PV）
编程模式（Program mode）
可编程序控制器（Programmable logic controller，PLC）
比例阀（Proportional valve）
转子（Rotor）
转子轮毂（Rotor hub）
运行方式（Run mode）
传感器（Sensor）
设定值（Setpoint）
求和点（Summing junction）
阀芯（Valve spool）

监控和数据采集（Supervisory control and data acquisition，SCADA）

叶片泵（Vane pump）

偏航驱动（Yaw drive）

本章概述

本章将进一步介绍水平轴风力机的主要组成部分，使读者进一步了解实现风能转换的叶片、轮毂以及机舱等风力机的主要部件，同时了解能够调整机舱位置使其进入或偏离风向从而使叶片捕获最大风能的偏航机理。

通过本章读者将了解可编程序控制器（PLC）并了解它是如何控制开关型输入/输出信号以及模拟输入/输出信号。模拟控制的信号可以在 0～100% 之间变化，同时系统在 0～100% 之间做出相应的响应。如果模拟信号是来自传感器，则它可以测量任何 0～100% 之间变化的变量数值。此外，读者还将了解到 PLC 是如何对风力机进行数据监测和数据采集的，同时 PLC 在保护叶片、转子轮毂、低速轴、齿轮箱、高速轴和发电机的前提下，如何对风轮机叶片和转子速度进行优化从而确保风轮机尽可能高效地运行。

本章最后一部分将介绍用来控制水平轴风力机各部分的液压系统及其元件，同时也将介绍到液压比例控制和液压伺服控制，它们为调整叶片节距、偏航方向和制动器提供了控制手段。

5.1　水平轴风力机概述

图 5-1 显示的是移除机盖后的两叶片水平轴风力机，图中叶片并未安装。此风力机的功率是 80kW，大约有 10ft 长。从图中可以发现：转子伸展于风力机前端，叶片将通过螺栓与转子连接在一起，轮毂通过低速轴与齿轮箱连接，齿轮箱的输出轴直接与发电机的输入轴连接。所有这些部件都固定在机舱底座上，然后在上面加机壳封盖。位于发电机附近的液压系统直接安装在风力机机舱后部，其主要作用是对转子制动和叶片节距进行控制。在大型风力机中，如果需要的话，会加装冷却系统对发电机和齿轮箱进行冷却。诸如风速计和风向仪等传感器一般置于机舱顶部后侧，用以采集关于风速和风向的数据，并将这些信息输入到控制器优化风力机的运行。

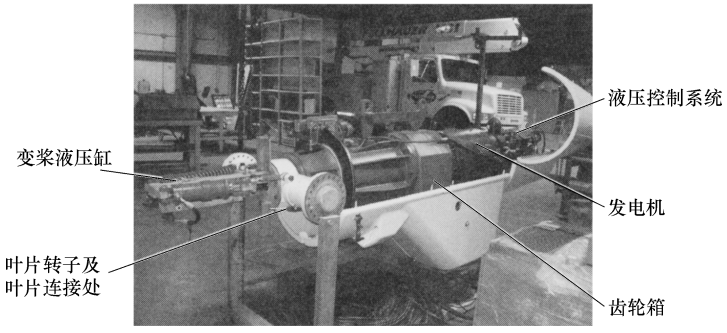


图 5-1　水平轴风力机的基本组成部分

安装有各部件的机舱底座被固定在塔架的顶端，在机舱座的底部用螺栓安装了一个偏航机构，用来调整位于塔架顶端的机舱的方向。对机舱方向的调整称为偏航控制，这个过程通常由一个大电动机或者是液压马达来完成。

5.2 机舱和机舱底座

图 5-2 显示的是一个装在塔顶的机舱，其顶部打开以便于工作人员对其主要部件进行检查。从图中可以看到，位于机舱前端的转子通过一个低速轴与齿轮箱连接，部分被遮挡了的发电机通过高速轴与齿轮箱输出轴相连接。除了偏航机构被装在机舱座的底部以外，所有上述部件都被安装在机舱底座上，并且由机舱盖封闭。

图 5-2 为了方便工作人员对齿轮箱和发电机进行检查而被从顶部打开的机舱（图片来源：Siemens Wind Energy）

图 5-3 显示的是一个将要被吊装到塔顶的完全装配好的机舱，安装在机舱座底部的偏航机构可以将机舱固定在塔架上。一旦机舱在塔顶安装到位，其叶片可以分别被加装到转子上。如果风力机需要彻底大修的话，则机舱盖可以被打开或者移走，可以单独替换安装在机座上的各个部件，也可以将底座上安装有各种部件的机舱进行整体替换。图 5-4 显示的是一个正在通过大型起重机向塔顶吊装的机舱，当机舱在塔顶安装就位后就可以加装叶片。

图 5-3 准备安装到塔架上的完全装配好的机舱（图片来源：John Fellhuer jfellhauer@ surenergy. us）

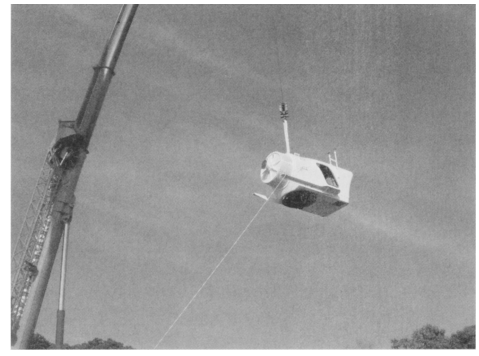


图 5-4 正通过大型起重机向塔顶吊装的机舱（图片来源：Northern Power Systems Inc. ）

5.3　转子轮毂和叶片类型

水平轴风力机的转子轮毂实际上是转子装配总成的一部分，如图 5-5 所示。图 5-6 显示的是安装到转子轮毂上的叶片。安装到轮毂上的叶片及轮毂将作为一个整体被吊装到空中，并作为一个完整的单元安装到低速轴的转子盘上。图 5-7 显示了机舱被提升到指定位置的过程。从图中可以看到，在机舱前端突出的连接在低速轴上的转子盘。图 5-8 显示的是一个起重机正准备将叶片组装件整体吊装到机舱前端的指定位置。图 5-9 显示的是工人们正准备将叶片和轮毂安装到在机舱前面伸出的低速轴前端转子盘上的情况，工人们正在对准转子盘和叶片整体组装件上的螺栓孔并在孔中楔入巨大的螺栓，在螺栓上加装垫圈后拧上螺母以使叶片整体组装件和转子固定在一起。

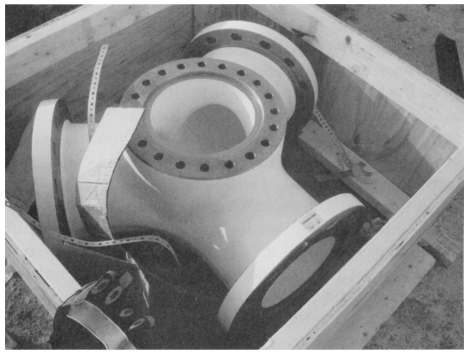


图 5-5　转子轮毂，叶片被固定在这个轮毂上后将被安装到机舱前端的转轴上（图片来源：Northern Power Systems Inc.）

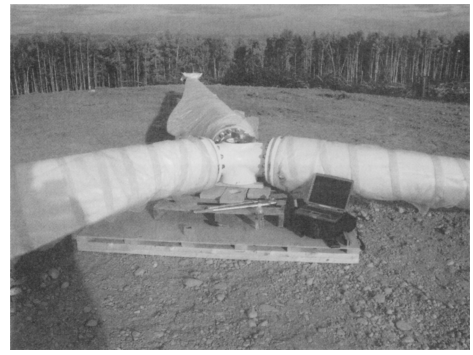


图 5-6　被固定在轮毂上的叶片被整体吊装到机舱（图片来源：Northern Power Systems Inc.）

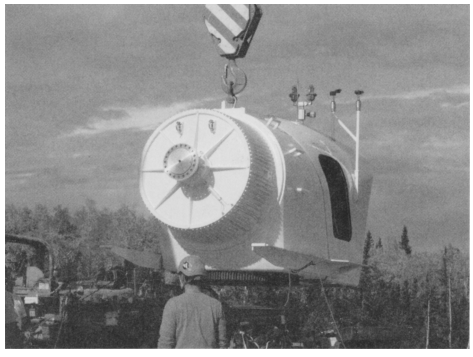


图 5-7　转子盘连接到低速轴并且固定于机舱前部（图片来源：Northern Power Systems Inc.）

图 5-8　叶片组装件被吊装到塔顶部机舱的前端，确定好位置后被通过螺栓安装到转子盘（图片来源：Northern Power Systems Inc.）

对于中型风力机而言，叶片组装件一般是在地面上用螺栓固定到机舱上然后再用大型起重机进行整体吊装。对于较小的系统而言，转子轮毂在地面上被安装到机舱上。这时，首先要在地面把机舱加装到塔架上，然后调整机舱位置以便当机舱和塔架还在地面上的时候将叶片逐一加装到轮毂上。当叶片安装完毕后，机舱、叶片和塔架作为一个整体通过大型起重机吊装到位。

图 5-9 叶片组装件安装到转子盘
（图片来源：Northern Power Systems Inc.）

对于一些大型风力机，由于叶片太大，只能在将机舱固定到塔架顶端后逐一将其安装到转子轮毂上。叶片需要在机舱被起吊至塔顶并固定就位后安装。由于叶片太重，只能一次起吊一个，叶片吊起后在转子轮毂处由专业人员将其固定。由于叶片太重并且叶片的安装必须在机舱固定到塔顶之后进行，所以这种安装方式显得尤为复杂。

5.4 叶片的数量

水平轴风力机的叶片数量可以为 1 ~ 5 片，叶片转速一定时，风力机的叶片越多，则其捕获的风能就越大。在捕获相同风能的条件下，单叶片或双叶片风力机的转速比三叶片风力机高。图 5-10 显示的是单叶片风力机组，看起来它像是有三个叶片，但事实上那些小的臂状物只是用来配重的。当转子旋转时需要这些配重臂来保持转子平衡，这些配重臂并不会像普通叶片那样能够捕获风能。图 5-11 显示的是几个双叶片风力机，这种风力机的两个叶片互为平衡并且都能捕捉风能。

图 5-10 单叶片风力机，小的臂状物是平衡体
（图片来源：Powerhouse Wind Ltd.）

图 5-12 显示的是三叶片风力机，当转速相同时，这种风力机比单叶片和双叶片风力机能捕获到更多的风能。如果一个单叶片或者双叶片风力机要获得和三叶片风力机相同的风能，则双叶片风力

机运行转速要高于三叶片风力机，而单叶片风力机运行转速则比双叶片风力机更高。这就意味着单叶片和双叶片风力机的轴承比三叶片风力机工作强度更高，更易损坏。

图 5-11　双叶片风力机
（图片来源：U. S. Department of Energy）

图 5-13 显示的是一台五叶片风力机，安装在叶片周围的整流罩能引导自然风更有效地穿过风力机叶片。这种类型的风力机比安装有更少叶片的机型捕捉到的风能更多，但其主要的缺点是叶片数量的增加带来了更高的成本，并且这种类型风力机的塔架要更坚固以确保能够在强风中安全稳定。

图 5-12　三叶片风力机
（图片来源：Vestas Wind Systems A/S）

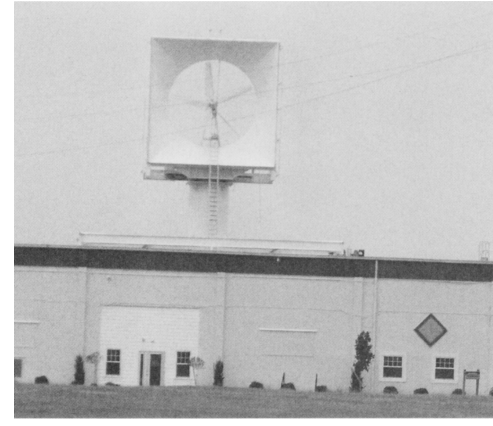


图 5-13　五叶片风力机

5.5　叶片节距控制

水平轴风力机的转子叶片有几种不同的调节方式。可以通过调整叶片节距使叶片捕获更多的风能，而小型双叶片风力机的叶片可以在强风下产生回摆，这可以减小强风对叶片产生的压力。有些风力机叶片在基部与转子相连并可以围绕其轴线旋转，叶片节距指的是叶片围绕其轴线在 0° ~90°角度范围内的旋转位置（自由度）。

通过调节转子叶片的节距（在其基部旋转）以使叶片与风向形成的攻角最大从而捕获最大风能；也可以通过调整叶片节距使叶片不能捕获风能，此位置下的叶

片被称作“feathered”（薄板）状态。此时正对风向的不是叶片侧面，而是叶片边缘。图 5-14 为处于“feathered”状态以确保在维修过程中不会转向的叶片，而图 5-15 中的风力机叶片则旋转到其侧面（“flat”）几乎与风向相对，这样就可以捕获最大风能。在大型风力机中，叶片可以在“flat”和“feathered”两种状态间进行任意的节距位置调整。液压系统根据自然风的具体状况调整叶片节距以确保叶片能实时捕获最大风能。在高风速情况下也可以通过调整叶片节距保护风力机叶片避免超速损伤。

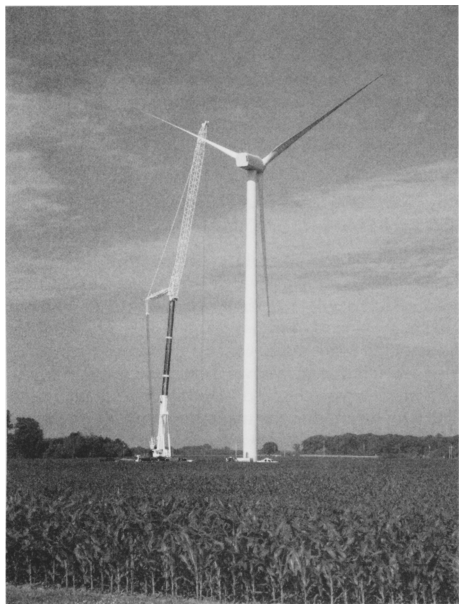


图 5-14 处于“feathered”状态以确保在维修过程中不会转向的叶片

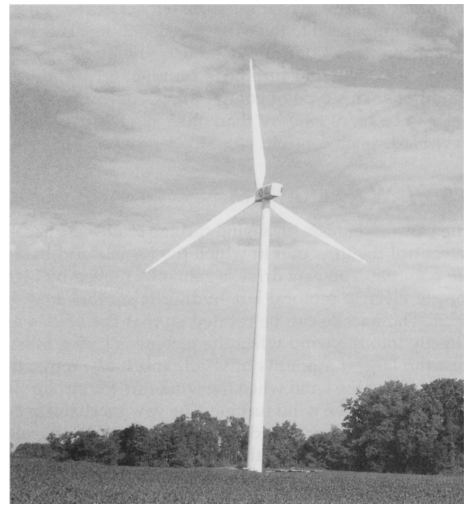


图 5-15 旋转到其侧面几乎与风向相对以捕获最大风能的叶片

双叶片和三叶片风力机的各个叶片可以同时进行相同的节距调整，或者，在某些更复杂的风力机中，每个叶片可以分别进行调整以使风力机更高效。节距调整可以使风力机在低风速时获得更多风能，这样变桨（节距可调）型风力机比定桨（节距固定）型风力机能在更低的风速下起动。在后面内容中将会详细介绍通过液压系统和机械装置进行叶片调整的原理。

另外一种可以保证叶片旋转安全的调整手段是所谓的“跷跷板式运动（teetering）”。当风力非常强劲时，风力机叶片的叶尖会向机舱内侧弯曲，有可能会弯曲到接触塔架的程度。如果风力机有两个叶片，则这种作用会被放大，在强大的风力情况下，叶片会与塔架接触而损坏。“跷跷板式轮毂（teeter hub）”可以在大风时起到允许叶片弯曲的作用。“跷跷板式轮毂（teeter hub）”使得叶尖以塔架的方向反向摇摆，从而使叶片远离塔架以保持安全间隙。风力越大，叶片的“跷跷板”作用越强，以保证叶尖与塔架具有足够的安全距离。叶片的摇摆范围较窄（大约

为 ±2°），但这在大风作用下对于保证叶片旋转过塔架时不与之接触已经足够了。

5.6　转速及其控制

所有水平轴风力机在高、低速运行时都必须进行相应地控制，高速时实施控制的目的是避免转速过快而损伤叶片。如当长度为 125ft 的叶片以 18 ~ 22r/min 的转速高速运行时，叶尖速可以超过 260ft/s，相当于大于 175mile/h 的速度。如果叶片更长或者转速更高，则叶尖速可以超过 200mile/h。在这种高速运行工况下，叶片会在风力产生的力矩以及叶尖的巨大离心力长期作用下受到损伤。对于大型风力机，高风速时可以通过控制叶片节距使叶片转速降低，最终达到控制其最大转速的目的。速度控制也可以通过改变机舱偏航位置来实现，即将机舱正面略微地移出风向。当偏航控制使风轮直接迎向来风时，叶片将以最大转速旋转；当偏航控制移动机舱使风轮并不直接迎向来风时，叶片转速将不能达到其最大值。

一些大型风力机在其控制器中嵌入了能使叶片在阵风时承受更高风速的程序。通过使叶片短时间超速运行，从而转换阵风时的能量。此时多余的风能被转化为电能并在短时间内由发电机输出，从而不会损伤叶片、主轴以及齿轮箱。

当叶片旋转过快时，即使是较小的风力机也可能会遭受叶片和转子的损伤。每一台风力机都有一个不容超越的最大转速。风力机有一系列控制最大速度的方式。在较小的风力机中，速度控制可以通过节距控制或者失速控制来实现。当叶片角度调整到使得叶片不再捕获风能的某一位置时，此时来风虽然经过叶片，但并不转化为旋转动能，这就是失速控制。在一些带有机械系统的小型风力机中，叶片位置控制通常将叶片调向几个固定位，叶片在这几个固定位之间进行小增量调整，直到风力机转速获得足够的减小或增加，这要视具体需要而定。当风力机在较低风速情况下起动时，叶片需要逐步调整到适合低风速最大风能捕获的位置。如果风速达到了不安全级别，叶片位置则调整到失速状态下，此时风力机叶片开始减速。

小容量的风力机通常采用一种调速器类型的设备来控制最大转速。当转速增加时，调速器的质量锤外摆从而在叶片转子上施加更多作用力。当速度过高时，调速器的自身重量加强了制动效果从而使风力机叶片转速降低到安全转速下。

5.7　叶片的独立变桨控制

大型风力机的控制系统非常复杂，各叶片的节距可以分别进行调整以优化负荷，使风力机更高效。液压变桨机构中，通过采用若干阀门和闭环控制算法的液压系统来调节和优化叶片节距，在风速变化时实现最大风能捕捉。这种系统除了装有测量发电效率、风速和风向的传感器外，在每个叶片上都分别安装了独立的传感器。当风向和风速等风况改变时，传感器可以监测这些细微变化并对叶片节距进行

修正，每个叶片的节距调整量略微不同，以确保能量供应的最优化。前面提到的统一变桨（节距）技术则没有这么复杂，统一变桨时各叶片的节距进行等幅调整。

5.8 基于负荷效率的节距控制

通过叶片节距的调整可以控制风能向电能转化过程中的风力机负荷效率。风力机负荷效率是对叶片风能捕获效率以及发电机电能转化效率的综合衡量，用 0 ~ 100% 的百分数来表示。通过调节叶片节距来改变负荷效率，从而尽可能多地捕获风能，并通过发电机转化为电能。当风力很小时，调整叶片来使其得到维持持续发电的转速，如果风速太低则叶片旋转缓慢，此时控制器可使发电机甩掉负荷来保持叶片持续旋转。控制器通过调整节距使叶片即使在微风中也能旋转，当叶片速度增加到一定程度时，可使发电机重新加载。

当风力很强时，控制器可以调整节距实现最大风能捕获，同时降低叶片转速，使其处于可控范围内。控制器不断对发电机输出进行采样，并将其与风速和叶片转速对比，然后不断地调整叶片节距使风力机运行在最优状态下。这种类型的控制使新型风力机比那些没有节距控制的老式风力机效率更高。

5.9 偏航机构

风力机的偏航机构通过旋转机舱来控制机舱和叶片（风轮）的朝向。偏航驱动通常采用大转矩电动机，有时候也可以采用液压马达。旋转机舱可以使叶片正对来风从而捕获最大风能，也可以在强风时将叶片移出迎风面来避免强风对风力机的损害。偏航机构的主要部件是一个安装在机舱底部被称为偏航环的大圆环，偏航环通过齿轮与偏航驱动电动机啮合，当驱动电动机旋转时，偏航环转动从而使带动机舱转向。图 5-16 给出了一个位于机舱底部的典型偏航机构，因为大型风力机的机舱和叶片非常庞大，所以这些风力机的偏航控制可应用最多达 7 个偏航驱动电动机来驱动偏航环。图 5-16 中的风力机相对较小，所以只需要一个偏航电动机来旋转机舱。

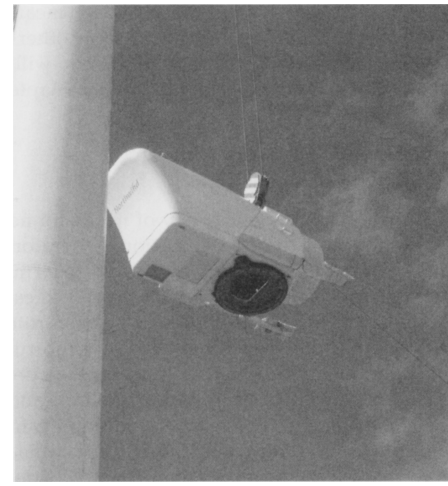


图 5-16 机舱底部的偏航机构和驱动电动机，驱动电动机驱动偏航环使得机舱旋转（图片来源：Northern Power Systems Inc.）

某些较小容量的下风式水平轴[㊀]风力机靠来风自动调整偏航方向，使叶片保持正对着来风的方位。这种类型的风力机在机舱上装有巨大的尾翼，它可以使来风自动调整机舱位置从而使其保持面向来风。这种风力机使用一个偏航计数器来确保在向相反方向回转之前只能旋转 4 ~6 圈，原因是如果允许机舱朝着一个方向持续旋转，则可能导致大型的电力电缆发生缠绕而拗断。电力电缆用来传输安装在偏航底盘上的发电机输出的电能，偏航时机舱围绕着塔架转动，而塔架不转动，从而可能使电缆发生扭曲损坏或者承受巨大应力。偏航计数器使风力机只能朝着一个方向旋转 4 ~6 圈，然后通过偏航机构驱动其反方向回转以实现解缆。

5.10　偏航驱动

图 5-16 中的偏航驱动电动机可以采用电动机或液压马达。如果偏航驱动采用的是电动机，则通过齿轮的啮合传动来获得低转速、高转矩的输出。永磁电动机是很好的偏航驱动设备，因为它能在低速时产生较高的转矩。偏航环同样也依靠一个齿轮啮合，选择合适的传动比使偏航电动机可以平稳地移动安装在机舱底座上的机舱部件。由于偏航电动机转矩高、转速低，所以它只能以很小的速率移动或调整机舱。

5.11　偏航控制

偏航驱动电动机通常由风力机的 PLC 或计算机控制器控制。控制器从风速计等传感器中采集包括风速和风向在内的各种数据，并将这些信息反馈到一个闭环控制系统中。闭环系统决定如何对机舱进行方向和幅度的调整，以确保发电机能通过叶片获取最大风能。

图 5-17 中的两台大型风力机的叶片的朝向略有不同，这种不同是由于风向的不同和风力机内控制系统的不同造成的。控制系统的主要功能是合理地调整节距和叶片方向使发电机获得最大的风能。图中两台风力机相距约 1000ft，这样的距离会使风

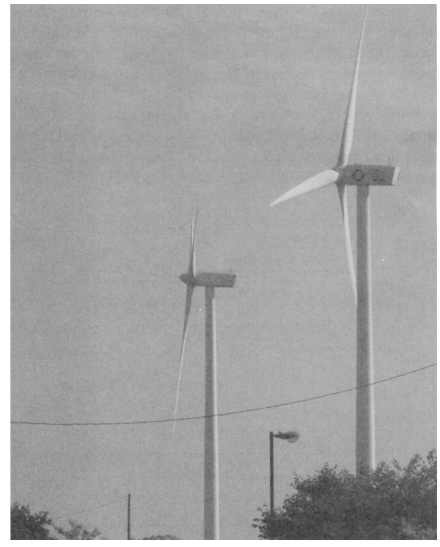


图 5-17　这两个风力机距离很近，但是它们的偏航系统使叶片的朝向略有不同

㊀ 原文误为“垂直轴”，应该为“水平轴”。——译者注

向产生一定差异，因而在偏航控制器调整下各风力机的朝向略有不同。PLC 或计算机控制的偏航系统同样也会监测机舱的旋转圈数，以确保机舱旋转时不会拉扯发电机上的电缆引起缠绕。如果机舱朝着一个方向旋转了很多圈，则计算机就会控制其向相反的方向旋转实现解缆。

对于小型的风力机而言，它可以根据风向变化自动调整迎风方向，但大型风力机必须在偏航系统作用下才能实时调整机舱位置，使得风轮面向来风方向捕获最大风功率。如果风向发生变化，则机舱持续调整使叶片时刻保持最佳方向。

5.12 偏航制动

某些情况下机舱位置需要被锁定，这样风向改变时其不会发生移动，此时就要在偏航环上添加一个偏航制动装置。偏航制动装置通常采用与汽车上的盘式制动相似的圆盘式制动器。它由两个固定在偏航环两侧的垫片组成，图 5-18 表示了这种类型制动器的原理。当制动器没有起动时，两个盘式制动片并不与偏航环接触，此时偏航环可以自由转动；当制动器起动时，液压制动系统向制动缸注入液压油，从而驱动制动片使其与偏航环抵在一起并产生压力。制动缸的液压压力持续增加时，制动片产生压力会增大，直到制动片与偏航环之间产生的摩擦力能阻止偏航环转动。制动片和制动系统必须足够大，以实现机舱在风力机所能遭遇的各种强风情况下的可靠制动。某些系统，通常是小风力机，一般不采用液压系统来驱动制动器，而是用大弹簧来实施制动。大多数系统的机舱制动器和风轮制动器设计都考虑了失效保护的问题，也就是说，当液压系统失压或出现其他问题时由大型弹簧来实施后备制动。本章后面将会进一步介绍液压系统。

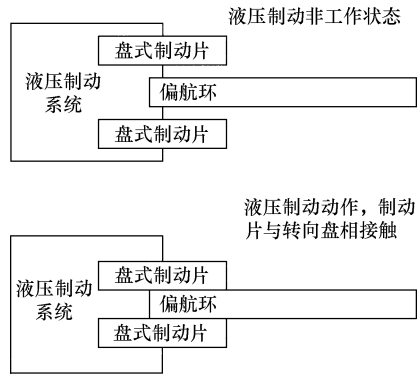


图 5-18 处于自由状态（上图）和制动状态（下图）的偏航制动器。在一些系统中，采用大型弹簧保持制动状态，采用液压系统解除制动状态

5.13 数据采集和通信

风力机需要采集多种数据，诸如风速、风向、发电机电压和电流以及与电能生产和日常维护有关的设备运行小时数等。风力机的 PLC 或计算机控制器从大量的传感器中采集数据，如风向、风速、发电机电压和电流、机舱方向、叶片节距以及其他与风力机控制相关的信息，并将这些信息通过一个网络传送到数据采集系统。

图 5-19 所示为一个数据采集链实例，它从风力机中采集数据然后通过电话线、互联网或局域网传输，所有这些数据被送到控制中心处理和存档，以便于日后分析。随着时间的推移，这些数据给出了风力机的运行状况以及每月不同时日下风能的获取情况，同时也能提示哪些月份风能最佳以及是否应该在附近续建风力机。

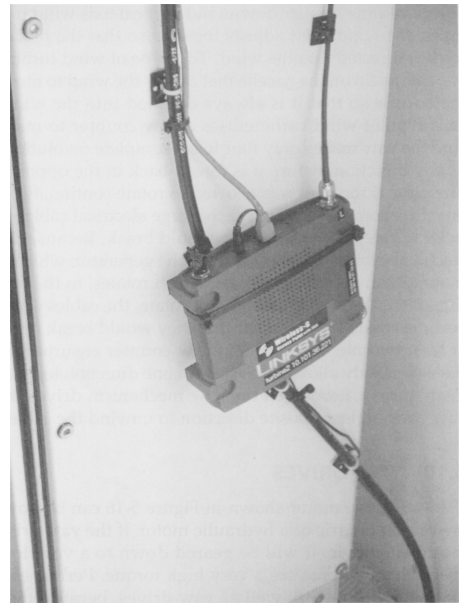


图 5-19　数据采集设备：从风力机中采集数据然后通过电话线、互联网或局域网传输到数据中心

这些信息中的大部分数据也可以应用于风力机的日常维护工作中，例如发电机总发电小时数、发电机产生的电压和电流等。当与实际的维修过程相联系时，如判定轴承、齿轮、主轴和其他风力机机械部件的使用寿命时，这些信息非常有用。这些数据可以在线监测，也可以从文档中调取后制成电子表格或图形，为决策提供帮助。基于这些数据，技术人员通过对比风速、风向与发电量大小可以判断系统是否存在问题。例如，如果在 20mile/h 的风速下，一台风力机产生的电能远少于上个月，则暗示风力机很可能存在问题。

5.14　风速计和风向仪

风速计通常安装在机舱顶部靠近后面的位置，用来测定风速信息。由于风速计和叶片在同一水平高度上，所以它可以观测任意时刻叶片可以获得的风速大小。当风速计与风力机的 PLC 或计算机控制器相连时，它可以以秒为单位对风速进行数次采样，并每分钟做一次平均，或者以更高的频率采样。一种典型的廉价风速计是由轴上安装有几个杯状螺旋桨的简单永磁直流发电机构成的，当风吹过时，这些杯状螺旋桨就会旋转并通过轴带动直流发电机转动，风速越快，杯状螺旋桨和直流发电机的转速就越快。当直流发电机旋转时就会产生很小的直流电压，一般为 0 ~ 12V。

另一种典型的风速计也使用旋转杯状物来捕捉和采样风速，但不同的是它不是带动小型发电机旋转，而是采用了一种被称为磁性开关的小型磁性传感器。这些传感器在通过固定在其附近的金属齿时会产生小的电流脉冲，磁性开关的磁场每次通过金属齿都会相应地产生一个小的电脉冲，一个频率计数电路接收这些脉冲信号并将其转换成风速数据。信号脉冲数越多，说明风速越高。经检测，这种风速计的精

度在1% ~2%之间或者更高，所以它可以实现准确的风速测量。图5-20显示的就是一个杯型风速计和风向仪以及相应的电子电路，这些电路将风速转换成4 ~ 20mA的电流环信号。某些风速计将它们的信息转换为0 ~10V或者是0 ~12V的电压信号进行传送。

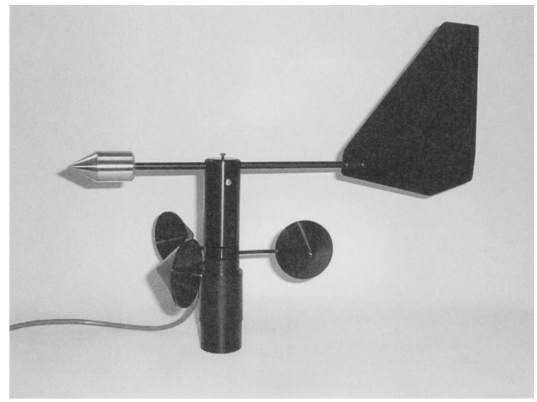


图5-20　测量风速的风速计，传感器将风速信号转化成4 ~20mA的电流信号（图片来源：Nova Lynx Corp.）

5.14.1　风向仪

图5-20中的风向仪为一片状物，被风吹动时与来风方向保持一致。片状物的轴上接有一个20kΩ的电位计，这个电位计实际上就是一个受旋转轴调整的可变电阻，在一周（360°）范围内的运动可使其电阻值在0 ~20kΩ之间变化。风向仪轴的运动并不被限制在一周内，但在每一个罗盘方位上电位计都有相同的阻值变化。例如，0°对应0Ω的电阻，90°对应着5kΩ的电阻，180°对应10kΩ，270°对应15kΩ，而360°则对应20kΩ。20 kΩ的电阻信号被发送到电路板（见图5-20）并作为4 ~20mA电流环电路的一部分。风向信号以4 ~20mA的电流形式被送入PLC的模拟输入模块，这些信号一方面被控制器用来控制叶片节距和机舱方向，另一方面也被作为风况数据存档。

图5-21　超声波风力测量器（图片来源：R. M. Young Company，www. youngusa. com）

5.14.2　超声波风力测量设备

另一种典型的风力测量设备被称作超声波风力测量仪，这种传感器可以用来测量风速、风向和气温。图5-21给出了一个超声波风力测量仪的实例。还有一些类型的超声波风力测量仪可以用来测量空气密度。空气密度和气温的测量之所以重要，是因为风力机叶片获得的风能在密度大、相对温暖的空气中会更大。超声波风力测量仪配有集成加热环，能在冬季融冰融雪，确保仪器准确工作。

超声波传感器有许多传感点，超声波信号可以在各传感点进行传送。无风时超声波信号的速度是恒定的，有风时超

声波脉冲将发生改变，这种变化蕴含的信息被转换成风向和风速信号。

5.15　风力机监控和数据采集（SCADA）系统

监控和数据采集（SCADA）系统在工业领域已经有多年的应用了。工业用SCADA系统用来监测重要的生产信息，风力机的 SCADA 系统用来采集风电场中一台或多台风力机的数据。

SCADA 系统可以用来远程起动、停用或复位风力发电机，既适用于单一的风力机设置，也适用于风场中风电集群的设置。SCADA 系统采集的其他信息包括振动信息、发电机诊断信息、来自高速轴和低速轴的信息以及齿轮箱信息。SCADA系统的数据可以用来通过与类似风力机作对比来对风力机进行维护和故障追溯。

经过几年的数据采集后，这些数据可以被用来开展生产预测和制订负荷计划。当风场中大量的风力机与电网相连接时，SCADA 系统可以帮助风电实现与电网中火电和核电等其他发电厂的集成。SCADA 系统在火力和核能发电中已有了多年的应用，其大部分电能生产数据和发电机数据与风力机的采集数据是相同的。SCADA系统也提供风力机的安全信息，包括录像、照相和其他安全数据，如每台风力机上应用的防火系统信息等。

SCADA 数据通常通过 PLC 或计算机控制器以及遍布系统的各个传感器获得。通常，传感器数据也用在对风力发电机的控制中，因此这些数据就有两个用途：一是送入计算机或 PLC 中控制风力机，二是存储起来作为存档数据。

SCADA 系统可以利用电话线、互联网、以太网、RS232 串行总线、Profibus 现场总线、无线电或其他网络协议，来在风力机内部 PLC 和计算机、风电场中风力机网络之间传送数据。由于有些数据是专有的，需要用到诸如防火墙软件等基本的网络保护措施来保护系统免受外界入侵。此外，SCADA 系统都有一个服务器，它是网络中的一台用来收集和存储数据的专用计算机。

5.16　风力机控制系统

大型风力机采用计算机控制系统来控制叶片节距、机舱偏航方向、所有的系统制动器以及发电机负荷。在小型风力机中，计算机控制可能仅仅控制叶片节距、偏航位置和发电机；在其他一些类型的风力机中，计算机控制系统可能仅仅控制发电机。计算机控制系统可能是由一个专用控制器或一个通用型 PLC 实现，大型风力机的控制器通常安装在机舱内，中型和小型风力机的控制器既可以安装在机舱内，也可以和开关设备一起放置于地面的电气柜中。本章后面将会介绍 PLC 或专用控制器应用传感器采集信号和计算逻辑来对输出元件进行控制的原理。图 5-22 显示的是一台风力机的典型电气控制柜。

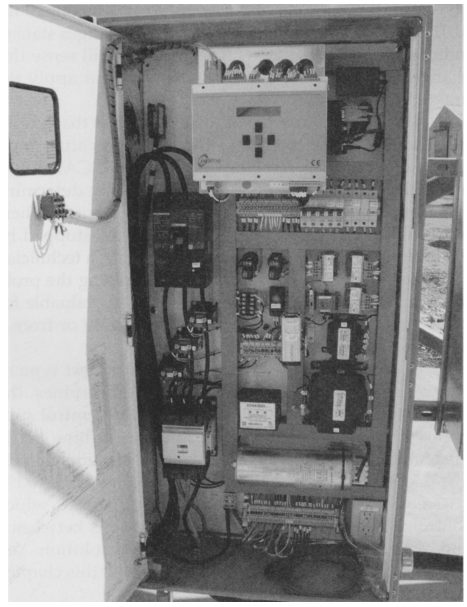


图 5-22 中型风力机的计算机控制系统

当风力机接入电网时，其内部的计算机控制器同时也实现对发电机的监视和控制，当发电机需要与电网相连时还要控制发电机实现并网。风力机中，电气互联控制由继电器和接触器来完成，而其他控制功能则通过计算机完成。

5.17 可编程序控制器（PLC）的基本原理

可编程序控制器（PLC）是一种专用的计算机控制器，主要控制继电器、接触器、液压电磁线圈以及电气开关等设备所需的逻辑（AND、OR、NOT 等逻辑）运算。PLC 可以很容易地接入其他不同电压等级的控制设备。与其他类型的计算机不同的是 PLC 设计有工业类型的开关，如 110V 按钮、110V 安全限位开关、接近开关和光电开关，这些开关通过一个被称为输入模块的光电隔离型接口与 PLC 连接。PLC 同样含有一个相似的输出模块，该模块通过对低压接触器和电动机起动器线圈的通断电来实现对高压三相电动机的控制。图 5-23 显示的是电气控制盘上的一个典型的专用控制器。

专用控制器或 PLC 的计算机部分是一个中央处理单元（CPU），可以在其内存中写入实现各种逻辑功能的程序。PLC 中的程序不是用传统的计算机编程语言（如 BASIC、Fortran 或 C + + 等）编写，它是采用由接触器和线圈符号构成梯形逻辑来说明哪个开关应该控制哪些输出。这些符号看起来很像典型的电气继电器梯形图。在多数系统中，这些程序执行效果可以在计算机屏幕上显示，激活液压电磁阀动作或者控制其他输出通断的开关动作和输出情况可以以动画的形式模拟。动画中

包括对图表中输入、输出符号通电时的高亮显示，有些系统则用发光二极管（LED）来表示输入、输出被激活时的状态。这些特征使技术人员能很容易对风力机中的任何电气元件进行故障诊断，从而判定其处于通还是断的状态，或者判定其是否正常工作。PLC 的另一个使其在风力机中得到广泛应用的重要特点是它可以在恶劣的条件下工作，不会像一般计算机那样容易死机或重启。

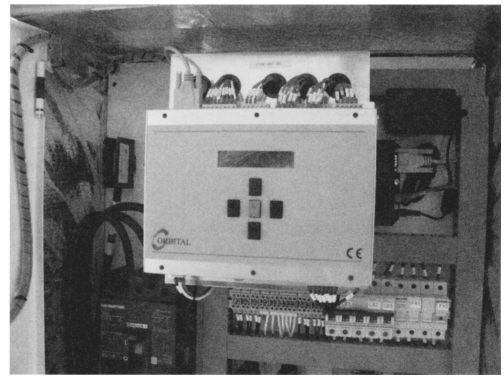


图 5-23　用于中型风力机的 PLC 专用控制器

PLC 在风力机控制应用较广的另一个原因是逻辑程序在设计阶段可以轻松编写，然后可将程序存储在一个称为 EPROM（可擦写可编程只读存储器）的电子存储模块中。EPROM 将程序存储在一个不需要电池的存储芯片中，这样不但可以确保程序不会因为断电而丢失，也使得程序一旦被存储成功便可随时为控制器调用。EPROM 的另一个特点是，如果技术人员或工程师没有特殊的 EPROM 写入器，就不能改变 EPROM 中的程序。在风力机控制中这是非常重要的，因为它确保了只有具备资格的工程师和技术人员才可以对控制器程序进行修改。一些风力机生产厂家采用商用 PLC，而其他的一些厂家则通过修改系统制作出专用型计算机控制器。无论 PLC 还是专用型计算机控制器，其运行原理都是相似的。

图 5-24 给出了一个 PLC 程序的实例。该程序看起来像一个继电器电路图。随着程序规模的扩大，需要添加额外的连线。这样就使得整个图表看起来好像是一个多级梯，因此这种图被称为梯形图，特指梯形逻辑。

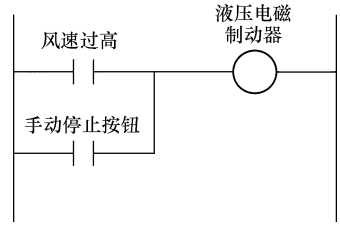


图 5-24　PLC 中控制液压制动器的典型梯形逻辑程序

PLC 最早出现于 20 世纪 60 年代，主要应用在工厂自动化中。最初的 PLC 功能是为了代替那时在工业控制电路中大量使用的机电式继电器。早期的工厂自动化中大量采用继电器，使故障排查变得非常困难。继电器的运行非常慢，并且当需要更改控制电路时必须花费昂贵的成本来重新布线。1969 年，自动化工业领域设计出了关于可替换继电器的可编程电子控制器的规范。最初的 PLC 事实上只是一种序列器之类的装置，按照一个精确的次序来执行梯形图中每一条连线的功能。20 世纪 70 年代，PLC 逐渐发展到今天的微处理器形式。PLC 允许编写程序并将其存储在存储器中，当需要修改控制电路时仅需要修改相应程序，而不必重新布线。这第一次使得采用控制器对系统进行故障排查变得灵活易行，从而使技术人员能很快辨别出各元件的工作状况，并判定其是否出现问

题。这个特点使复杂电路的控制和故障诊断变得异常简单。

5.17.1 简单的 PLC 程序分析

图 5-24 所示的梯形逻辑程序中有控制一个输出线圈的两个输入开关，开关信号来自一个风力超速传感器和一个手动停止按钮，输出线圈用于控制风力机制动器中的液压油。程序采用的工作方式是 PLC 逻辑部分持续发出“if-then”（“如果-那么”）问题，由于这两个开关是并行关系，任意一个状态为真时控制器便激活输出线圈，起动制动器。PLC 持续不断地执行程序并发问答指令，当风速开关监测到风速过高，或者手动停止开关被按下时，输出线圈便被激活。PLC 以 20ms（0.02s）的时间周期不断扫描程序。也就是说，任意开关信号的状态为真时，PLC 便会立即检测到这些变化并激活液压电磁阀，从而起动制动器，这一切只需要 20ms。

PLC 的另一个重要特点是技术人员既可以通过便携式计算机现场检查程序，也可以通过 SCADA 系统或其他网络接口进行远程操作，然后判定输入开关状态和输出线圈是否被激活。当出现问题时，比如风力机已经在制动器的作用下停止转动但相应条件不成立时，则技术人员可以迅速地检查出是哪一个开关信号造成的麻烦。仅这一个特色就使得 PLC 在风力机的故障诊断与排查中具有突出价值，无论是实地操作还是远程操作。

梯形逻辑图是 PLC 应用的最简单的程序类型。在一些大型风力机中，PLC 可以执行一些复杂的循环控制程序来控制偏航、叶片节距和其他一些复杂的调节系统。这些控制系统采用模拟控制的方法，根据计算结果数值控制输出在 0 ~ 100% 范围之间连续变动。在本章后面将进一步介绍。

5.17.2 一个简单的 PLC 的基本构成

所有的 PLC 都有四个基本的组成部分，即电源、处理器、输入模块和输出模块。而其他部分——程序编写设备如便携式计算机等，并不被认为是其基本组成部分，因为 PLC 在从 EPROM 芯片中调取程序时并不需要它们。典型的 PLC 的输入设备有直接与输入模块相连的手动按钮，以及直接与输出模块相连接的输出设备，如控制制动器起/停的液压电磁阀。在 PLC 发明之前，每一个开关都直接与其控制线圈相连。而 PLC 中这些开关则与相应的模块相连，PLC 内决定哪个开关控制哪个输出的程序采用的是“if-then”梯形逻辑。这样，只需要在安装过程中进行一次物理线路的连接，然后就可以通过修改梯形逻辑来无限次地修改控制电路。

5.17.3 利用便携式计算机或台式计算机对 PLC 进行编程

PLC 编程需要采用 PLC 制造商提供的软件，可以在便携式计算机或台式计算机上创建并存储 PLC 程序，然后下载到 PLC 中。只要程序被下载到 PLC 后便被存储到 EPROM 中，并可以设定密码保护以免被未获授权人员改动。一旦程序被写入 EPROM 中，只要 PLC 重启程序，都可以重新加载到 PLC 中。这就使得 PLC 不会在程序未加载或未验证的情况下起动，从而使其成为一款可靠的控制器。开发程序时，编程人员可对软件每一级程序添加注释，从而使故障诊断技术人员可以分清程

序的执行情况。

便携式计算机上 PLC 软件的另一个特色是可以用颜色和文本来注释 PLC 程序，从而表明哪些输出和输入被打开或关断，同时表明状态转换的发生时间。这个特点使得技术人员可以通过互联网等网络节点登录控制器并且从世界任何一个地方对风力机控制器进行诊断。

PLC 程序的另一特点是可以根据需要对程序进行扩展，比如增加导通延时定时器、关断延时定时器、计数器以及种类繁多的数学功能。PLC 程序中定时器和计数器功能的优点是不含容易出错的电子元件，并且预置时间和计数值可以通过修改程序灵活改变。PLC 的附加指令提供了一套完整的数学函数集以及对内存变量的操作方式。现代化的 PLC 和专用风力机计算机控制器具有一些小规模大型机的计算能力，能够控制数百个输入和输出。

5.17.4　运行模式下 PLC 程序的执行

PLC 处理器的处理逻辑是逐行地调取和处理程序。实际上，PLC 处理器在运行模式下要处理很多附加功能，包括输入数据的读取、处理逻辑以及逻辑计算结果的输出，处理器执行这些功能的过程称为程序执行（扫描）。图 5-25 给出了一个程序执行（扫描）周期的例子。

PLC 判定与其输入模块相连接的开关何时通电或断电，当某个开关的触点闭合时，便将电压传送至输入模块电路中。输入模块的电子电路采用发光二极管和光敏晶体管来接收 110V 交流信号并将其转化成处理器可以承受的弱电压信号。

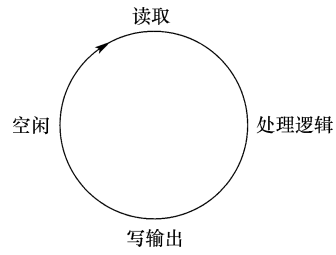


图 5-25　PLC 执行（扫描）周期：从输入数据的读取、处理逻辑到逻辑计算结果的输出

当模块通电时，程序里代表实际开关的触点便改变状态。采用编程面板来检查 PLC 程序的触点时，如果它们所代表的开关被激活则将高亮显示，此时 PLC 将转换程序触点的状态。例如，如果触点被设置为常开，则当实际开关闭合并且模块被激活时，PLC 就会使相应的程序触点由断开状态转变为闭合状态，看起来程序触点将能量传递到后续的触点上。如果一条线上的所有触点都传递能量，输出就会被激活。

5.17.5　镜像寄存器

镜像寄存器是 PLC 最不为人所熟知的部分之一。镜像寄存器也被称作镜像表，是 PLC 中用来追踪每一个输入和输出状态的一块专用存储区。镜像寄存器有 1bit 宽，图 5-26 表示了一个镜像寄存器。从图中可以发现，PLC 的每一个输入和输出在内存中都有相应的位，处理器在相应位上置 0 或 1 来表明对应输入或输出的激活或非激活状态。处理器监测每个开关是否激活来确定每个程序扫描周期内所有输入的状态。如果开关被激活，输入模块便向处理器发送信号，处理器在镜像寄存器的

相应位上置二进制 1 来表明输入状态；如果开关未被激活，则将相应位置 0。这就意味着在程序扫描的读阶段，镜像寄存器为实际的所有输入状态做了一份复制记录。

在 PLC 扫描的第二阶段，处理器用镜像寄存器内的值来解决特殊的梯级逻辑问题。例如，如果输入 1 和输入 2 相“与”后，来激活输出 12，处理器查询对应输入 1 和输入 2 的镜像寄存器地址并做“与”逻辑运算。如果所有的开关都是高电位（导通），则镜像寄存器内相应位置 1，处理器做逻辑运算后将相应的输出 12 激活。

在处理器做完逻辑运算并确定要激活的输出后，处理器进入扫描循环的第三阶段，即向输出 12 在镜像寄存器内相应的地址位写入 1，这被称作处理器扫描过程中的写周期。当输出 12 的镜像寄存器地址接收到 1 信号时，其立即向对应的输出模块地址发送信号。这样就激活了输出模块的电子电路，从而使与之相连的设备如电动机起动线圈和励磁线圈通电。

有必要了解的是，PLC 处理器每个读周期都更新一遍镜像寄存器的所有地址，即使只有一两个地址位被程序调用。当处理器处于逻辑运算阶段时，它对程序的每一梯级按从左至右的顺序进行逻辑求解。也就是说，如果一行逻辑有几个相“与”的触点和几个相“或”的触点，每一个逻辑功能的运算顺序是自左而右的。同时，处理器按照从上到下的顺序进行每行逻辑的运算。因为处理器以大约 20 ~ 40ms 的时间周期执行扫描，所以各行逻辑运算看起来好像是同时执行的。

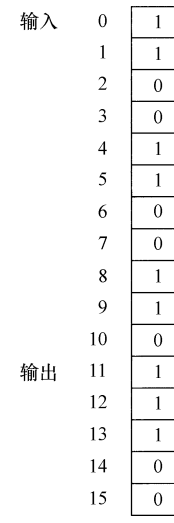


图 5-26 PLC 镜像寄存器，每一个输入和输出在内存中都有相应的位，0 或 1 来表明对应输入或输出的激活或非激活状态

当第一（梯）级中的控制继电器的触点被用来激活第二（梯）级的输出时，逻辑运算顺序就显得尤为重要。这种情况下，处理器要用两个完整的扫描周期来读取第一级的输入并将输出写入第二级。在第一次扫描中，处理器读取镜像寄存器并判断相应的起动按钮是否被按下。当第一级的逻辑运算完成后，控制继电器被通电。直到第二次扫描处理器才检测控制继电器触点的改变，此时处理器再一次读取镜像寄存器，并在第二次扫描的写周期中最终激活第二级的输出，与输出地址相对应的电动机起动线圈通电。同样需要指出，即使程序只用到一两个输出，处理器在每次扫描的写周期也要重新写入每个输出的状态。

镜像寄存器对故障诊断人员也非常有用，因为寄存器内所有地址的内容都可以在屏幕上显示出来。技术人员可以将镜像寄存器内的状态与输入、输出模块以及与之相连的实际开关和线圈的状态进行对比。

处理器中的镜像寄存器对应于程序中的控制继电器。控制继电器是仅存在于PLC 内部的继电器，在某些系统中这些继电器被称作记忆线圈或内部线圈。控制继电器有一个线圈和一组或几组常开或常闭触点，当控制继电器的线圈被激活时，所有的继电触点转换状态。因为控制继电器仅存在于 PLC 程序内部，并不采用硬件实现，所以它们并不会产生所谓的接触不良或线圈开路等问题。也就是说，如果一个控制继电器的触点状态没有从断开状态向闭合状态转化，此时不必怀疑线圈会发生误动，相反应该检查一下程序中为继电器线圈供电的控制触点：它们可能有一两个开路，从而导致线圈未被通电。

当处理器处于运行模式时，在每次扫描的写阶段处理器都对输入、输出和控制继电器的相应镜像寄存器进行更新。由于镜像寄存器以 20 ~ 40ms 的周期进行持续更新，所以可在任意时刻将寄存器内容通过打印机或彩印终端输出来反映运行过程中重要开关的状态，这使得技术人员在问题出现时的诊断工作量大大减少。例如，如果一个正在检查风力机运行情况或做预防性维护工作的技术人员通过 PLC 程序发现一个问题时，他可以进行自行检修而不必花费更大代价去请专业的故障诊断师。那些妨碍风力机起动和正常运行的状况被作为故障输入到 PLC 程序中，这些故障可以在彩色显示屏显示和被监测。例如，在大型系统中只需要机舱的舱口或舱门处于半开状态，则技术人员就可以在监视器上观测到故障情况。这样，PLC 不仅可以控制机器的运行也可以应用于故障诊断中。

5.17.6　运行模式和编程模式

当 PLC 处于运行模式时，其不断地执行扫描周期。也就是说它不断地监测其输入、进行逻辑运算并更新输出。当 PLC 处于编程模式时，它并不执行扫描周期。最初使用“编程模式”这个词是因为较早的 PLC 在运行模式下执行扫描周期时其程序是不能改变的。

采用 PLC 编程软件可以在个人计算机上开发梯级逻辑程序，然后将其下载到 PLC 中。如果直接在 PLC 内存中编写梯级逻辑程序对 PLC 进行直接操作，则这个过程称为“在线编程”；如果在个人计算机或编程器上编写 PLC 程序，则这个过程被称为“离线编程”。大部分 PLC 编程软件都允许在不与 PLC 直接相连的个人计算机上编写程序，即不必在 PLC 上编写新程序或修改程序。如果 PLC 不含微处理器芯片，则所有的编程工作必须离线完成，然后将程序下载到 PLC 存储器中或者直接载入 EPROM 中，当 PLC 上电时首先从 EPROM 中读取存储内容。

5.18　PLC 的输入与输出

输入和输出模块通过用来装配输入输出模块的机架上的电子线路与 PLC 处理器相连接。模块在架子上的位置被称作“物理地址”，技术人员通过物理地址来连接输入开关和输出设备上的线路。技术人员亦可以凭此物理地址来检测相应终端和

模块的线缆电压，以确定其是否出现问题。

到此，本书已经对输入和输出进行了一般意义上的说明。事实上，处理器必须按照一个地址和数字来访问每一个输入和输出。每一款 PLC 都有自己的地址编码方式，但通常分成两类：一是对各输入和输出模块进行顺序编码；二是按照输入和输出模块在机架上的位置进行编码。大部分小型 PLC 以及大约半数的中型 PLC 都采用顺序编码方式。

5.18.1 输入和输出指令

当具体的电气开关与输入模块相连接时，开关触点可以是常开（NO）的，也可以是常闭（NC）的。例如，急停按钮是一个常闭触点，这样当开关出现问题或出现断线故障时，系统将停止运行从而使系统处于故障安全状态。其他类型的开关可以被接成常开形式。当在 PLC 程序中用到输入指令时，输入指令可以被用作为一系列经过编程的常开和常闭触点。常开触点的符号如下所示：—| |—，而常闭触点的符号则如—| / |—，触点中间加一斜线表示它是闭合的。PLC 监测输入模块和镜像寄存器来判定具体的物理开关是否闭合，然后改变开关触点的状态。

如果电路被激活，则处理器在镜像寄存器内的相应位上置 1；如果电路失电，则处理器在镜像寄存器的相应位上置 0，以此来跟踪各电路的状态。由于输入、输出模块也使用小型的 LED 作为状态指示，所以诊断人员可以通过模块前端来判定输入电路是否通电。

输出指令包括传统的线圈，以符号 —( )— 来表示，此指令被称为“输出”。同时也提供如锁存型 —(L)— 和非锁存型 —(U)— 的特定输出指令。锁存型输出在其被输入激活后维持激活状态，即使相应的输入端已经失效。不同于锁存型输出，非锁存型输出则在输入失效后恢复到 0 状态。锁存线圈输出和非锁存线圈输出以成对方式工作时必须具有相同的地址。

风力机系统中应用锁存线圈使带电的输入失电后维持线圈状态。需要注意的是，即使系统断电后又带电，锁存线圈的相应字段依然为 ON。这个特点在诸如故障诊断等应用中非常重要。系统很多时候会出现诸如过热或过电流等不正常运行情况，当系统检测到故障后会根据相应逻辑及技术或运行人员设置的时间自动关机，过一段时间随着系统的慢慢冷却系统会恢复正常，此后很难检测到系统为什么关机。此时如果在检测逻辑中加入锁存线圈，当过热故障出现时，相应的故障字段置 ON，并且此字段将保持 ON 的状态直到检测人员发现故障并通过故障复位开关触发非锁存指令。

锁存线圈的另一应用就是机舱内的冷却水泵和风扇。这些电路中使用锁存线圈是因为电动机必须在一次断电事故后能自动恢复到正常工作状态。如果此时在程序中应用的是常规线圈，则技术人员必须到每一个电动机或水泵处按动按钮来起动每一台设备。而如果使用锁存线圈，即使断电后线圈仍能保持其状态。也就是说，如果断电时锁存线圈是激活的并且电动机处于运转状态，则锁存线圈相应位的状态将

保持激活直到重新通电，此时电动机会自动重新运转。

5.18.2　输入开关和输出装置与 PLC 的连接

如果输入开关和输出线圈被应用于风力发电机的 PLC 系统中时，它们一般都要与输入、输出模块在硬件上相连接。图 5-27 给出了这样一个例子，在这个例子中有一个常开触点和一个常闭触点，它们分别和两个输入地址相关联，还有一个用于控制液压泵的电动机起动器线圈（MS1）和一个液压阀控制线圈，两者又分别和两个输出地址相关联。从图中可以看出，110V 交流电源为向 PLC 输入模块提供信号的开关供电，同时它还为与输出模块相连的电动机起动器线圈和液压阀控制线圈提供能量。这些都使得风力发电机系统需要一些标准的电气开关和其他元件。

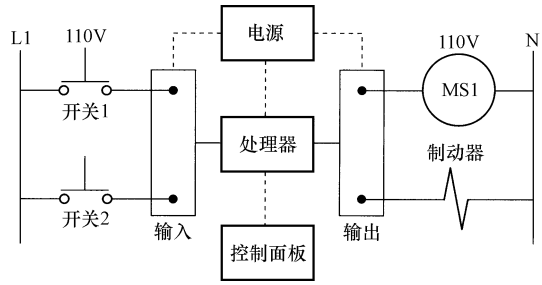


图 5-27　与 PLC 输入输出模块相连的输入、输出电路电气图

5.19　PLC 模拟控制

PLC 也可以采用模拟控制在传感器和输出装置之间传输信息，例如风速传感器和偏航电动机。模拟的意思是指过程变量，例如电动机位置，可以是 0° ~ 360°之间的任意值。低速轴的速度传感器可以测量 0 ~ 100r/min 之间的任何值，另外还有可以测量高速轴速度的传感器。举例来说明，假定一个转轴的最高速度是 3600r/min，在任意时刻表示转轴速度的量值都应该在 0 ~ 3600r/min 之间，这两个值分别称作最大和最小模拟值，这种控制也叫作 0 ~ 100% 控制。实际上，风力发电机中的过程变量都可以由最小值和最大值之间的数值来表征。举一个日常生活中的例子，比如灯的开关：如果开关闭合，灯就会亮；如果开关断开，灯就会灭掉。这是一个通断控制的例子。如果这盏灯有一个调光开关，就可以把它当作模拟控制的例子：可以把调光器放在 1/4 的位置上，这样就有 25% 的亮度；还可以调节调光器使灯有 50% 的亮度。事实上，我们可以调节调光器使它在最大和最小值之间任意变化。模拟控制的另外一个例子就是厨房水槽上的水阀：可以把水阀稍微打开一点、半开或是全开，而这取决于想从水龙头里取得水量的多少。

在模拟系统里，可用百分数来描述控制行为，有时还可以使用实际数值，如转速值或液压值。在 PLC 系统中一般使用电压或电流来控制这些参数，因此有必要讨论一下模拟系统中常用的电压和电流范围。表 5-1 展示了风力发电系统中最常用的电压和电流信号，表中也说明了 PLC 的值是 12bit 的，也就是在 0 ~ 4095 之间。可以看到电压的范围在 0 ~ 10V 之间，电流的范围是 4 ~ 20mA。在这些范围中，

0～10V 的范围使人们很容易利用最大值 10 来计算百分数。同时，注意到 4～20mA 的范围没有从 0 开始，但仍然可以把它视为一个最大-最小模拟系统。此处所述的 4～20mA 系统是测试仪器中最常用的，它从 4mA 开始，而不是从 0 开始，所以它可以指示系统发生断线或开路的故障。如果采用 0 值，当系统处于最小工作点和发生开路故障的时候都将表现为 0 值，这将很难决定是哪个条件引起了 0 值。当取 4mA 作为最小值时，工程师可以迅速地判断出究竟是由于系统处于最小工作点而指示的 4mA，还是由于系统断线而指示的 0mA。因为断线和开路是测量系统中最常见的问题，所以 4～20mA 在模拟控制系统中得到了广泛的应用。在本章的后面，可以看到模拟信号在液压系统中应用的例子。

表 5-1 电流、电压和发电机转速的模拟值

模拟值(%)	PLC 值(0～4095)	电流(4～20mA)	电压(0～10V)	发电机转速 (0～3600r/min)
100	4095	20 mA	10V	3600r/min
75	3073	16 mA	7.5V	2700r/min
50	2047	12 mA	5.0V	1800r/min
25	1024	8 mA	2.5V	900r/min
0	0	4 mA	0V	0r/min

PLC 一般具有模拟量输入、输出模块。一个模拟输入模块允许各种模拟值来表示警报输入、从传感器传出的风速与风向、发电机产生的电压和电流等信号。这些模拟信号对应的电压、电流通常在最大和最小值之间变化。模拟电压信号一般为 0～10V，模拟电流信号一般为 4～20mA。PLC 的模拟输入模块一般使用二、四、或八通道来读取信号，这也意味着从风速传感器和风向传感器传出的电压信号可以和不同的通道相连接。风速传感器和它能测量的最大值是匹配的，例如风速传感器可以这样标准化：当风速为 100mile/h 的时候，传感器送出 10V 的电压信号；当风速为 50mile/h 的时候，传感器送出 5V 的电压信号；当风速为 25mile/h 的时候，传感器送出 2.5V 的电压信号。模拟信号的主要特征是 0～10V 之间的电压信号可以和 0～100mile/h 之间的任一数值相对应。模拟系统的分辨率接近 0.1V 左右。

风速传感器的模拟输入信号可以用来调整叶片节距，当叶片转速太快的时候，它还可以用来判断是否向低速和高速轴投入制动器。另外，当风速高于 75mile/h 或 80mile/h 的时候，传感器信号还可以用来指示报警情况。模拟输入信号有这样一个良好特性：一旦经过测量并被写入 PLC 模拟输入模块，就可以用作多种用途。

由于模拟值是一个数值，它适用大于、小于、等于这些比较功能，其他一些如计算平均值等数学函数功能可以使测量值更准确。

模拟信号可以用于闭环计算，最后得到一个模拟输出值。例如，如果转子或低速轴转动太快的话，模拟输出信号可以作用于液压系统使其起动制动器实现制动。

模拟值变大时液压系统产生更大的作用力，从而快速降低转轴的速度。从 PLC 中送出的模拟信号可以是 0 ~ 10V 的电压信号或是 4 ~ 20mA 的电流信号。

5.20　基于 PLC 反馈控制的风力机控制

风力发电机中的许多控制系统都利用模拟控制和反馈传感器来实现正常运行。反馈控制也叫作闭环控制，图 5-28 画出了一个闭环控制系统原理图。如果与风力机中的实际应用例如偏航控制结合起来，就可以理解图中各个部分的作用。从图中可以看出，系统受设定值（SP）信号触发，SP 是一个对应于期望得到的目标的期望值。例如，如果期望偏航角度被调整为东 90°，SP 值就应该设置为 90°。

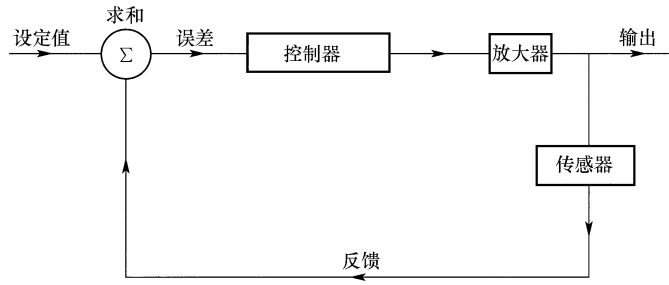


图 5-28　包括设定值、过程变量、误差、控制器和输出的闭环（反馈）控制系统原理图

控制系统的下一个要素为过程变量（PV），它来自指示动力机舱方向的传感器。例如，在控制机舱方向的系统中，PV 信号来自于闭环系统的方向传感器，PV 也叫作反馈信号，它是通过传感器测量到的机舱的实时方位值。由于传感器的检测是一个持续的过程，所以 PV 随着机舱方向的改变而改变。

加法器在控制系统中实现 SP 和 PV 的比较，在数学运算角度即由 SP 值去减 PV 值。例如，如果 SP 值是 90°，而 PV 信号表示的实际方向是 80°，我们可以得到差就是 10°，图中，代数和用希腊字母 Σ 表示。

SP 和 PV 间的差被称为误差，误差是代表机舱期望方位的 SP 与代表机舱实际位置的 PV 之间的差距。误差信号和 PV 信号都用百分比来衡量。当 SP 点的测量值大于 PV 时，误差为正数；当 SP 小于 PV 时，误差是负数。控制器通过改变输出来调整机舱方向。举例来说，系统的输出是通过一个液压马达来实现的，它可以驱动转轴并带动机舱旋转以改变方向，使叶片迎风。有一点必须记住：控制器总是试图调整误差幅值从而使得误差尽可能小，尽可能地使 PV 点接近 SP 点。

图 5-29 说明了偏航闭环控制系统的原理，图中控制系统的各个基本要素均被列出。该控制器采用闭环控制结构，当闭环控制程序被植入到 PLC 中后，SP 就成为机舱需要移到的新位置点。新方向可以通过一个能确定最佳方向的计算算法得出。该系统的传感器是一个类似指南针的方向传感器，检测的信号即为 PV。进行

信号反馈后，SP 和 PV 相比较进行求和运算，这一切都是在控制器内进行的。

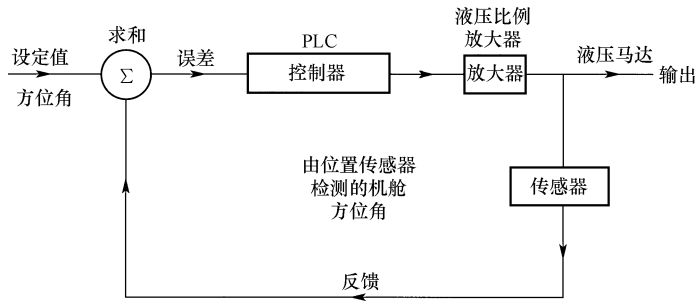


图 5-29 偏航闭环控制系统，该系统中由液压马达控制机舱偏航环的旋转速度和方向，而液压马达的液压流量控制则通过液压阀实现

经过计算后，控制器会向放大器送出一个输出信号，放大器控制液压马达中的液压油流量，从而控制马达带动机舱改变方向。该系统的放大器是一个液压比例放大器，它可以利用 0～10V 的直流电压信号控制液压电磁阀线圈中的电流。控制器向放大器送出电压信号作为输出信号，放大器通过改变液压电磁阀的位置来控制液压马达转动的方向和速度。

图 5-29 所示的控制系统之所以为“闭环”，原因是类似于指南针的方向传感器检测机舱方位角度后得到 PV 并将其反馈到加法器，在加法器中 PV 信号和 SP 信号作比较。由于传感器信号要反馈至加法器，所以传感信号也叫作反馈信号。当反馈存在时，信号流通路径构成闭环，因此相应的控制系统则称作闭环系统。

如果系统被设置为没有运用反馈信号的手动模式，则该系统被称为开环系统。在大多数系统里，人们一般都利用自动/手动开关来控制 PV 信号，来决定它是否运用于反馈。在自动模式中，如果开关闭合，传感信号将被应用于反馈；在手动模式中，如果开关断开，传感信号则不用于反馈。自动/手动开关决定了系统运行于开环或是闭环模式。当系统运行于开环模式时，输出将由操作者手动调整。例如，如果检修人员在维护时，需要将机舱移动到某一个确定的方向，系统需要运行于手动模式，机舱可以被手动移动到指定的方向。

5.21 基于 PLC 的功率控制

通过调节叶片和机舱位置实现的功率控制是由 PLC 或专用计算机实现的多个闭环控制中的一种。该控制环需要传感器来提供风速、风向、当前叶片节距、当前机舱位置以及发电机输出等信号，之后这些信号需要进行一系列称之为算法的数学运算。算法决定了风力发电机运行在最优工况所需的叶片节距、机舱位置和发电机的负荷量。

5.22　叶尖速的优化

PLC 能够控制大型风力发电机的另外一个环节就是叶片转速，而叶片转速反过来又影响叶尖速度。叶尖速度是指当叶片旋转时叶片尖端的线速度，它远远大于叶片与转子连接处的旋转速度。叶尖速度过大将会损坏叶片，如果 PLC 闭环控制能够调整叶片节距和机舱偏位置，那么在不同的风速和风向条件下，就可以控制叶片旋转速度。PLC 闭环控制为转子速度控制环的设定值提供了叶片的最优转速参考和最大转速限制。如果转子转速达不到最大值，控制回路会改变叶片节距和机舱偏位置，以确保风力发电机在当前工况下产生最多的电能。

5.23　基于 PLC 的叶片转矩优化

叶片转矩也是很重要的一个控制参数。当有风的时候叶片带动转子旋转，从而带动低速轴、齿轮箱、高速轴，高速轴驱动发电机产生电能。当输出电能开始增加的时候，发电机电磁转矩就会试图阻碍发电机轴转动。简单地讲，发电机电磁场产生的电磁阻力将对抗叶片提供给电机轴的驱动力并趋于平衡。这个反作用力将会在叶片上产生一个很大的力矩。当风速很高的时候，发电机输出功率最大，力矩可能会超出安全设计限值，会引起一个或多个叶片的永久性损伤。

PLC 可以通过一个闭环控制叶片所承受的最大力矩，该回路可以调整叶片节距、机舱偏航角，或者通过减负荷来使力矩回归到一个较低的、安全的范围。

5.24　PLC 程序存储及永久性存储器

一旦控制风力发电机的 PLC 程序被写入并经过测试，该程序就需要被存储，以便当 PLC 失去存储或当一个新的 PLC 取代原始 PLC 时提供备份。不论什么原因，当 PLC 需要更新时，所有和模块相连的配线和输入、输出模块都不用改变。这使得当出现问题时，很容易更换 PLC。关键是当更换一个 PLC 或者专用计算机的时候，都要确保原始程序能够下载到新的 PLC 中。为此，原始 PLC 程序必须被存储在可靠的介质中，以确保随时下载。存储程序的一个办法就是将其存入 EPROM（可擦写可编程只读程序存储器），EPROM 被安装在 PLC 主处理电路板上的插座内。只要 PLC 一上电，存储在 EPROM 中的程序就将自动载入 PLC 内存。即使有人对程序做出了未经授权的修改，EPROM 也确保原始程序总是能够重新装载到 PLC 中。EPROM 是一个可靠的存储芯片，不需要任何电能来维持其备用数据。有些 EPROM 可以在现场制作并存储程序，或者，当 PLC 程序需要大的修改时，经过校验之后可以烧写 EPROM 进行更新。

如果风力发电机与网络或 SCADA 系统相连时，作为文件形式的程序副本可以由网络来备份，或者可以存储在 SCADA 系统服务器中。需要 PLC 程序副本的工程师可以用便携式计算机登录 SCADA 系统，把程序下载到 PLC 中，还可以利用该程序烧写一个新的 EPROM。有一点很重要，那就是无论是程序及其文件的印刷副本，还是存储的程序电子副本，都要随时保证可用。

5.25 发电机励磁控制

风力机中对发电机励磁电流的控制也是属于 PLC 或专用计算机控制一部分。第 6 章将对发电机有更多的介绍，比如将会分析发电机励磁电流与发电机转速及发电机电能输出的关系。当发电机转动时，提供给发电机的励磁电流会最终决定其发电的效果。PLC 可以通过增加或减少励磁电流来增加或减少发电机负荷，这就会增加或减少作用在叶片、转子、转轴及齿轮箱上的力矩。

5.26 液压控制

液压控制系统利用施加一定压力的液压油来伸缩液压缸，或使液压马达转轴旋转。人们在叶片和转子轮毂连接处采用液压驱动器旋转叶片来调整节距，还可以利用液压驱动器旋转机舱以根据需要将叶片移入或移出风向。操作一台风力机，必须能够区分液压系统的基本组成部分，理解它们的作用。这些知识有助于在检修或安装期间看懂基本液压系统图样并能分析系统的运行情况。

5.27 液压系统在风力机中的作用

风力发电机上的液压系统由液压电源、执行器、控制阀和液压管道组成。该系统的基本器件有：用来储存液压油的储油罐，驱使液压油流动的液压泵，设定系统压力的控压装置，用于改变液压油流向使其在液压缸合适空腔中流动的换向控制装置，具有收缩扩张连杆的液压缸，液压油在内部流通驱动转轴旋转的液压马达。系统中可能还会有流量控制装置，它可以通过控制液压油的流量来控制液压缸扩张和收缩的速度，流量越多，连杆运动越快。液压泵的转轴由电动机驱动，液压动力装置由液压泵、电动机、储油罐和控制阀安装在一起形成一个液压动力单元，如图 5-30 所示。

只有扩张和收缩功能的液压缸就是一个最简单的液压系统。这种液压缸可被用来调整风力机的叶片节距。图 5-31 给出了一个风力机的典型液压系统，其中执行器是液压缸：当液压缸扩张时，连杆移出液压缸；当液压缸收缩时，连杆重新移回液压缸。对于用来控制叶片节距的液压缸来说，当连杆移动到扩张位置的时候，叶

片在某个方向上；当液压缸收缩时，它又驱动叶片恢复到起始位置。从图中也可以看出，液压油从储油罐流出，由液压泵送入系统，液压泵由电动机驱动。压力调整器可以通过自身旁路一些液压油使其流回到储油罐来调整系统的压力。送到液压缸中的液压油受换向阀的控制，图中所表示的换向阀是一个可以通过手柄手动更换的三位阀。当左侧手柄被扳动时，换向阀阀芯移向左侧，引导液压油流向液压缸的左端部，使连杆扩张；当右侧手柄被扳动时，换向阀阀芯移向右侧，引导液压油流向液压缸右端部，使连杆收缩。流量控制和单向阀可以控制流向液压缸中液压油的数量，从而控制液压缸扩张和收缩的速度。当液压油从液压缸的连杆侧底部流出时，位于图中右侧流量控制回路中的单向阀可以阻止来自液压缸右端的液压油的流动，使其流经流量控制器，从而控制连杆的扩张速度。电路中左侧所示的单向阀可以在液压缸收缩时，阻止液压油的流动，流量控制阀可以控制连杆收缩的速度。

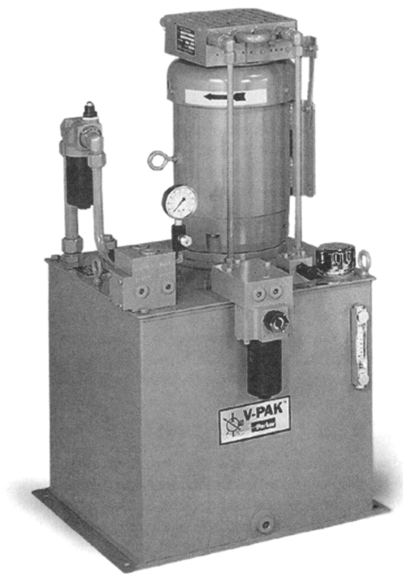


图 5-30　由安装在储油罐上的电动机和液压泵构成的液压动力单元

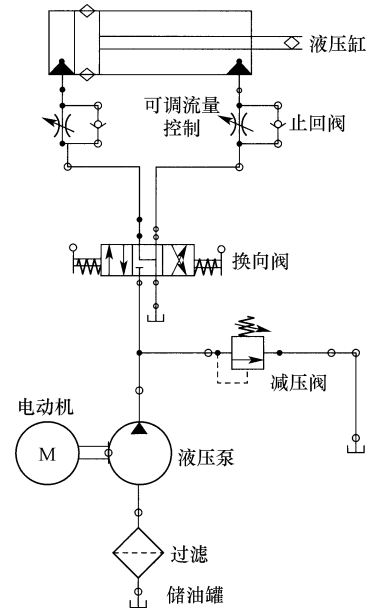


图 5-31　风力发电机的典型液压系统图

图 5-32a 是一个专门为改变风力机叶片节距而设计的液压缸；图 5-32b 是风力机的叶片，其中箭头指示叶片变节距时的旋转方向。在一些风力机中所有的叶片同步旋转，即所有叶片节距联动；而在另一些风力发电机中，每个叶片节距都可以有专门的液压缸单独调整。如果叶片节距由液压系统控制的话，可通过液压缸的扩张和收缩来调整叶片节距。在两叶片风力机中，两个叶片的节距控制由一个共同的连杆实现，此时只要通过一个液压缸改变连杆的位置来同时调节所有的叶片节距。

5.27.1　液压系统术语

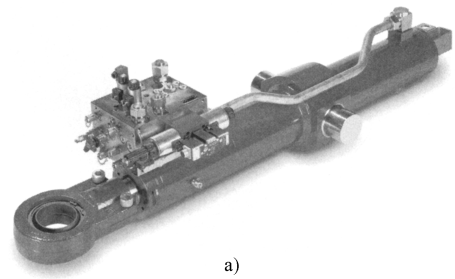
要了解液压系统的运行，必须理解和它相关的全部术语。无论任何液压系统，其主要目的都是为了做功。功被定义为力（比如说是推力或拉力）在一段距离上产生的作用。这可以用下面的公式表示：功 = 作用力 × 作用距离，或 $W = fd$；结果可以用英尺磅力（ft · lbf）来表示。例如，如果一个液压缸推动100lb的重量移动2ft的距离，它做的功就是200ft · lbf。

力是指一定面积上的压强，后者经常用磅力每平方英寸（lbf/in^2）来表示，压强也就是作用在每平方英寸上的力。

功率是指单位时间内做的功。这意味可以通过测量在某段时间内做的功来计算一个液压系统的功率。计算功率的公式可以表示如下：功率 = 功 ÷ 时间，或者 $P = W/t$。通用的功率单位是英尺磅力每单位时间（ft · lbf/time）。

需要牢记的是，功是力乘以距离。对于液压系统来说，功率的通用单位是马力（hp）。1hp 和 33000ft · lbf/min 或是 550ft · lbf/s 的功率相等。例如，如果液压系统在一分钟里产生了99000ft · lbf的功，可以用下面的式子计算马力数：

$$\frac{99000}{33000}\text{hp} = 3\text{hp}$$



a)

b)

图 5-32　a）调整风力发电机叶片节距的液压缸（图片来源：Bosch Rexroth Group.）b）箭头指示变节距时的叶片旋转方向

如果想利用550ft · lbf/s进行计算，则需要先换算99000ft · lbf/s。为此，用99000除以60，得到1650ft · lbf/s。然后用1650除以550，得到答案同样为3hp。在多数情况下，液压系统的功一般定义为每分钟内所泵出的液压油加仑数（gal/min），以及作用到每平方英寸面积上力的磅数来定义。这种类型计算的公式为

$$1\text{hp} = \frac{1\text{gal/min} \times 1\text{lbf/in}^2}{1714}$$

该公式也可表示为

$$1\text{hp} = 1\text{gal/min} \times 1\text{lbf/in}^2 \times 0.0007$$

此外，马力也可以用电气量功率单位来表示，1hp = 746W，而用英式热力学单位表示时为：1hp = 42.4Btu（British Thermal Unit）。

液压系统各量的计算公式较多且比较枯燥，在实际应用中接触到的通常是一些印刷图和查询表格，通过这些图表可以确定压力、流量和马力等参数。也能够通过相关的计算机软件来完成一些重要的计算和提供一些系统信息。另一个好的资源就是液压设备销售部的技术人员，他们会在很多方面来帮助进行主要部件的参数计算和选型。为了掌握这些基本知识，最重要的是记住公式的出处而不是强行记忆。

5.27.2　液压油动态特性

液压油动态学是关于液压油的流动和压力特性的科学。如前面陈述的那样，压力被定义为每单位面积上的作用力。以 100lbf/in^2 为例，它也通常记作 100psi，意味着在每平方英寸的表面上施加了 100lbf 的力。

流动过程是指液压油经过管道、控制机构和执行机构的运动行为。通常有两种方式来描述液压油流动特性：第一种是用速度来表述，即液压油通过给定点的速度；另一种描述是流量，即流过的液压油容量。流量可以用加仑数或立方英尺来描述。加仑/分钟（gal/min）与立方英寸/分钟（in^3/min，或 cu in/min）的转化关系为 1gal/min = 231in^3/min，需要指出的是术语“立方英寸/分钟”中用斜杠（/）代替了单词“per（每）”。也就是说，如果知道以 in^3/min 为单位的流量，则可以用下面的公式换算成以加仑/分钟为单位表示的量：

$$1\text{gal/min} = \frac{1\text{in}^3/\text{min}}{231}$$

如果知道每分钟的加仑数，可在每分钟的加仑数后面乘以 231 来计算出每分钟多少立方英寸。例如，现在是 4gal/min，可按如下公式进行换算：

$$4\text{gal/min} = 4 \times 231\text{in}^3/\text{min} = 924\text{in}^3/\text{min}$$

同样，如果现在是 693in^3/min，亦可按下式进行反换算：

$$693\text{in}^3/\text{min} = \frac{693}{231}\text{gal/min} = 3\text{gal/min}$$

通过计算每分钟的立方英寸数和每分钟的加仑数，可以确定需要多大的液压泵和多大规格的液压管道。

5.27.3　储油罐

储油罐也称之为储油缸，在液压系统中有多种功能。图 5-33 给出了一个典型的储油罐照片。储油罐最主要的功能是储存液压油以备系统的各种应用。例如，如果一个系统有多个液压缸，它们可能不会同时运动，所以只用到了少量液压油。而如果所有的液压缸都工作时，所需的液压油的数量就会很大。储油罐里需要储存足够的液压油以备系统高峰需求时使用。

储油罐的第二个功能就是用来将液压油在系统内流动时产生的累积热量排放到空气中。储油罐有一个很大的表面来散热，如果热量累积很快而储油罐又不能将其

完全排放到空气中，则需要向系统内添加一个热量交换器，用水或通过强迫空气循环的方式来散热。储油罐内装有隔板，可以阻挡油循环中产生的气泡进入液压罐的取油区。

图 5-33　顶部装有泵和阀门的储油罐

储油罐的另一功能就是为安装液压泵或电动机提供一个支撑平台。由于储油罐是由结实的金属材料做成，所以为液压泵或电动机的安装提供了一个良好的平台。由于使这些部件脱离地面，因此也节省了空间。储油罐有一个或多个用来在液压油被污染或者需要更换时将其排出的通道。在罐体上方或两边装有活动板，这些活动板通过螺栓固定，在需要的时候可以打开。安装这些活动板的目的是，在技术人员需要观察罐内情况或各种原因深入罐体内部时可将其打开。储油罐上同时装有油面高度计量器，它一般装在罐体的一侧用以监测油面高度。此外，液压罐带一个用以加油的有过滤层的孔，过滤层用于对液压油中杂质进行过滤。通常油罐内没有压力，所以此过滤层可以允许外部空气时刻与罐内相通。罐的底部装有排油槽，用以在维护或需要换油的时候将油放干。

图 5-34　典型的储油罐符号

图 5-34 给出了一个典型的储油罐符号。此符号在液压系统图中可能会用到多次，用于方便表示液压油的流出及流回路径，而不必具体绘出所有具体的流通线路。大部分图中会有多条返回储油罐的路径，所以这个符号使液压图更简洁而便于阅读。有时这个符号又被理解为“返回储油罐”。

5.28　液压泵

液压泵旋转的时候通过电动机将电能转化为液压油能量，泵的输出用流量速率来定义，即排液量。当液压泵以额定转速旋转时，它具有额定的输出流量和最大工作压力，处于额定运行状态。

有一种泵被称作“正排量泵”，该类型泵在每个工作周期中其轴转动一圈能提供一定的油量，正排量泵的排量为固定或可变。另一种类型的液压泵为“非正排量泵”。非正排量泵的输出量随着输入和输出口的大小、叶轮类型和系统压力而变

化。图 5-35 显示的是一个正排量泵。本部分后续一些图片和图表将显示不同类型的正排量泵的内部结构，如活塞泵、齿轮泵和叶片泵等。

液压泵驱动液压油流动时，液压油本身不能被压缩，只有流动的液压油在填满所有的空隙和阀门后才产生压力，同时形成了对液压油的约束。如果对于液压油的约束是可控的，则系统的压力就是可控的。非正排量泵轴每转动一圈时其输出液压油量是可变的。这也就是说当液体的流动被限制时，轴上的部分液体会绕过泵轴上的叶轮或叶片。这个特性在某些系统中非常有用，如传送泵和油池泵等，因为这种泵在某些意外情况下不会被损坏，如过滤层变脏或外部物质在系统中产生堵塞等。当然这种泵在大多数风力机的液压系统中用途不大，因为流量是不可预测的。多数风力机系统使用的都是正排量泵，因为它们在系统内各种变化的工况下产生同样的输出流量。改变正排量泵输出流量的主要方式是提供多条返回储油罐的旁路路径。可以通过对诸如减压阀等旁路路径上的流量调整，来从根本上改变流过系统的液压油容量。

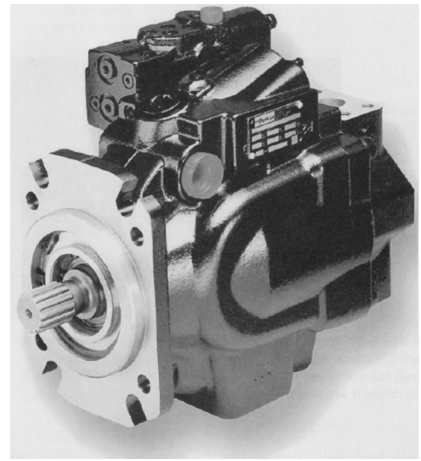


图 5-35　液压泵实例

图 5-36 左侧显示的是一个大功率电动机，右侧是一个大容量液压泵，此泵是系统的主液压泵。在大泵的前面有一个较小的先导泵（副泵），可以为控制回路提供相对较小的流量和压力。在后面章节中将会介绍控制回路和液压阀控制。

输出功率为 100kW 左右的小机组的液压系统设计相对紧凑，其主要部件如驱动泵的电动机等也要小得多。图 5-37显示的是一个风力机液压系统的蓄能器、集成管块、压力控制阀和换向阀等。液压泵及其驱动电动机位于集成管块下方，在图中看不到。液压泵的轴上有花键，这样使其可以通过联轴器由电动机驱动。这种类型的液压系统非常紧凑，当机舱在塔顶安装好以后必须对液压系统进行检查。也就是说，技术人员必须爬上塔架，打开机舱盖，然后检查各部件。大多数这种类型的风力机都有相应的小平台，以方便技术人员在检查或维修时站立。

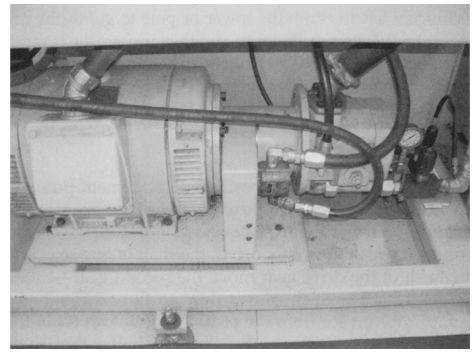


图 5-36　驱动大容量液压泵和较小容量先导泵的电动机

图 5-37 风力机的液压系统，包括蓄能器、集成管块、压力控制阀和换向阀，驱动液压系统的液压泵和电动机位于集成管块的下方

5.28.1 齿轮泵

齿轮泵是一种最基本的正排量泵，这种泵在泵体内有两个齿轮。图 5-38 显示的是一个双齿轮型的泵，电动机驱动一个齿轮的轴，驱动齿轮的轮齿啮合第二个齿轮（称为中间齿轮，此齿轮促使液压油流经泵体）。从图中可见，液压油充满了齿轮之间的空间。当驱动齿轮旋转时，它的齿与中间齿轮的齿相啮合，轮齿之间的油发生位移并强迫流经泵体。驱动齿轮的每次旋转都使一定量的油流出泵体。这也是这种泵被称作一种正排量泵的原因。

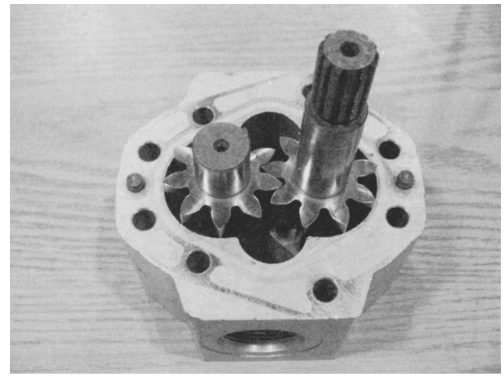


图 5-38 双齿轮正排量泵实例

5.28.2 叶片泵

图 5-39 显示的是另一种类型的液压泵——叶片泵。泵内的叶片为可以在转子槽隙中前后滑动的矩形金属片，图中的转子有 12 个槽但只有 4 个滑片，目的是更好地展示叶片在槽中的滑动方式和空槽的形状。

图 5-40 显示的是泵体内的叶片和转子。从图中可见，泵腔为椭圆形而非正圆。椭圆形泵腔为叶片向槽外滑动提供了空间，使其可以充分伸展以接触到泵体的侧壁。当叶片充分伸展时，便有足够的空间使液压油来填补空隙。转子旋转过程中，叶片会向泵体侧壁滑动，而泵体侧壁又会使叶片滑回转子。这个运动将会使原本液压油占据的空间明显减小，从而挤压液压油将其排出泵外。由于叶片间的油被排出

泵外，所以这种泵也被认为一种正排量泵。

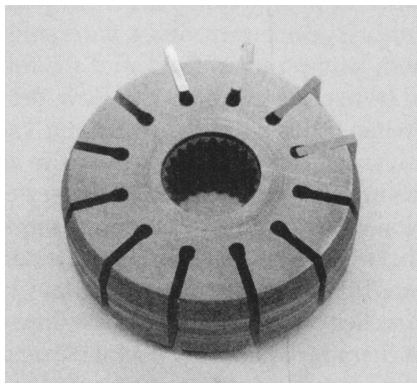


图 5-39　当叶片泵旋转时叶片可以在槽内自由滑动，本图只显示了 12 个滑片中的 4 个

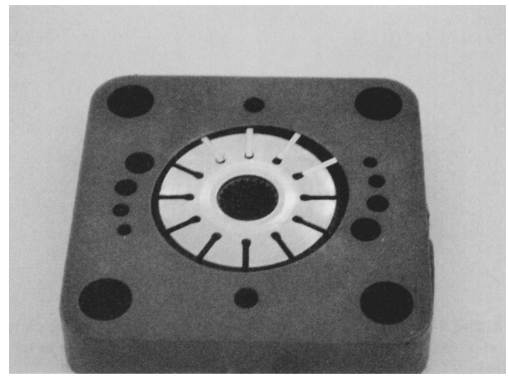


图 5-40　叶片盒内叶片泵的叶片

对这种泵的工作原理有了基本了解后，接下来将进一步详细讨论其工作过程。泵轴嵌在泵的转子中间，其键与转子上的键槽相咬合。泵轴上连接有电动机，通过电动机来驱动泵的转子旋转。由于泵腔是椭圆形的，叶片在转子旋转造成的离心力的作用下会被向外甩出。当叶片甩出来的时候，由泵入口进入的液压油就占据了其中的间隙。当转子继续旋转时，叶片和液压油会被推到泵腔另外一侧，在泵腔的这个方向上没有更多的空间，这样就促使叶片在槽内往回运动，这样就会压缩叶片间隙内的液压油，导致这些油向泵的出口方向流动。只要转子转动并且叶片能在槽内自由运动，泵体就能工作。叶片和泵腔被称作“泵体”，当泵体出现磨损或叶片卡壳时可以方便地对其进行更换。时间长了以后，叶片就会磨损，或者在槽内被卡住，这样就使得叶片不能完全滑出而吸入足够的液压油，这时泵的输出量较最初会明显减少。

5.28.3　凸轮泵

凸轮泵是另外一种重要的正排量泵，图 5-41 给出一个凸轮泵的结构图。可以看出其有两个互相交叉的凸轮，其中一个凸轮由泵轴驱动而另一个则通过凸轮之间的耦合被驱动。其基本工作原理解释如下：液压油从位于泵体底部的入口流入，这是一个凸轮不能触及的空间，当两个凸轮旋转时，由于凸轮的交错耦合以及它们中间空隙的减小使得液压油从泵内输出，这样凸轮旋转时就将液压油排向输出口。只要泵的输入轴持续旋转，凸轮就会不断地吸入液压油并将其排出。这种泵的工作原理和齿轮泵

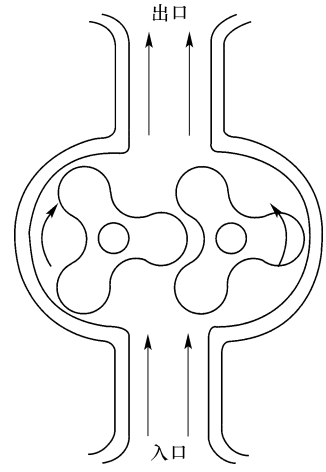


图 5-41　凸轮式液压泵

很相似，但凸轮不像齿轮那样容易磨损。

5.28.4 变容量泵

正排量泵的转子每转一周时，其输出流量是一定的。如果要使一个容量固定的液压泵的泵油量可变，主要的途径就是改变电动机的转速。由于在低速且输出功率不变时电动机的调速很难实现，所以发明了容量可变的液压泵。图 5-42 显示的是一种被称作“径向活塞泵”的变容量泵，泵的工作腔在底部，其活塞和旋转斜盘安装在顶部。这种泵通过改变活塞行程长短来改变每转排出的液压油容量。图 5-43 显示的是从液压缸内取出的活塞，左边的泵腔显示出了安装活塞的液压缸。活塞通过一个旋转斜盘固定，调整此斜盘可以改变每个活塞的行程。当旋转斜盘被置于某一方向时，活塞行程最大，从而使每个活塞的泵油量最大；而当旋转斜盘被置于相反方向时，活塞行程最小，从而使每个活塞的泵油量最小。

图 5-42 包括泵腔、活塞和旋转斜盘的变容量泵

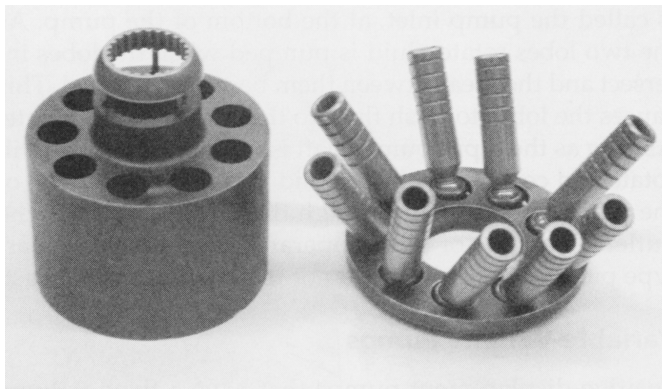


图 5-43 变容量径向活塞泵，左侧为泵腔内的液压缸，右侧为安装到旋转斜盘上的活塞

图 5-44 显示的是同一个泵，只不过旋转斜盘向左放置，从而使活塞获得最大行程，若是向右放置，旋转斜盘则将使活塞获得最小行程。变容量活塞泵的容量可以通过手动旋转或调整旋转斜盘的调整杆来改变，也可以通过模拟比例阀或伺服阀来进行连续改变。模拟比例阀或伺服阀可以使旋转斜盘以极小的变化量进行调整，从而使泵的输出量在 0 ~ 100% 区间内连续变化。可以根据不同的需要，采用计算机控制模拟比例阀连续地改变泵出容量。

是采用固定输出还是可调输出的正排量泵，要视风力机中液压系统的具体应用而定。变容量泵在使用中可以与流量控制阀配套实现液压油的流量调整，从而控制执行机构的动作速度，以改变机舱位置或调整叶片节距。变容量泵可以提供对液压

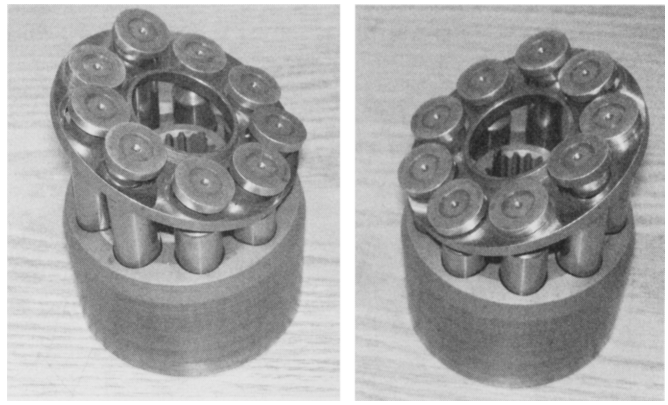


图 5-44　变容量径向活塞泵，当旋转斜盘左置时
活塞获得最大行程，当右置时活塞获得最小行程

油速度和压力的精确控制，通常通过压力和流量等传感器的反馈信号进行控制，确保系统运行的精确性。

5.29　方向控制装置

所有的液压系统都需要某种方向控制装置（如止回阀和换向阀）来根据应用的需要改变液压油流向。最简单的定向控制装置是单向阀（止回阀），其他更复杂的方向控制装置有两端、三端和四端换向阀等。方向控制阀可以手动操作，也可以通过液压控制回路操作，或者通过电磁阀操作。

5.29.1　单向阀

液压系统中采用单向阀来确保液压油按正确的方向流动。图 5-45 给出了单向阀的例子，单向阀由阀体和阀球两部分构成，阀球也被称作阀芯。当液压油以正确的方向流经单向阀时，阀球便从阀座上移开以保证最大流量。当液压油的流向不正确时，阀球被顶到阀座上，这样就使液压油的流动被阻止，某些单向阀采用弹簧将阀球固定在正确位置上。

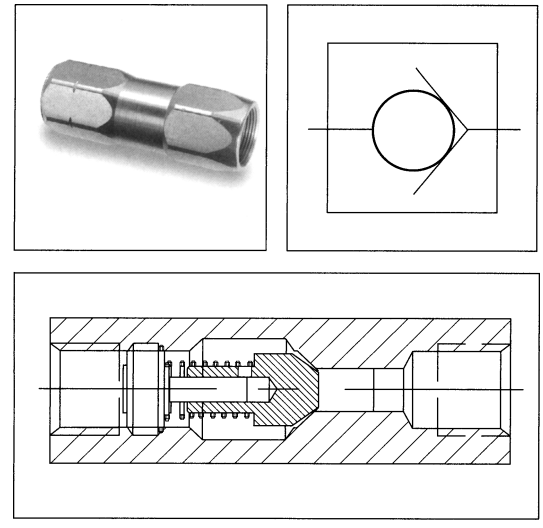


图 5-45　单向阀，用来确保
液压油按正确的方向流动

5.29.2　方向、压力和流量控制阀

液压系统受方向、压力和流量

控制阀的控制，下面将讲解这些类型阀的工作原理及其在风力机液压系统中的应用情况，介绍中将采用照片和示意图来说明各类阀的工作方式和特性。这部分内容可对从事液压系统的调试或检修工作提供有用的帮助。

5.29.3 方向控制阀（换向阀）

液压系统采用方向控制阀（换向阀）来控制流经系统的液压油的流向，方向控制阀的阀芯伸出或缩回阀体时就可以改变液压油的方向。方向控制阀根据其位置数（两位或三位）以及工作端口数（两端、三端或四端）进行分类。

图 5-46 表示了一个双位换向阀的主要组成部分。此阀由电磁线圈操纵，电磁线圈的符号为图中左侧所示的带斜杠的矩形框。如果换向阀是手动进行操纵的，则在阀的末端要有一个手动操作器的符号。

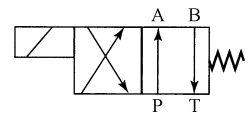


图 5-46 双位四端阀

双位四端阀的符号显示了两个方框，阀的位置数等于连接阀体各端口的方框数目，此图中的双向阀体有两个方框，而三位阀的符号则应该有三个方框。需要知道的是，仅看一个方框上的端口数就可以确定出整个阀所有的端口数。每个方框显示了不同的阀位置，而每个方框将重复显示端口，所以两位四端阀的符号看起来好像是阀左侧有 4 个端口，阀右侧亦有 4 个端口。事实上，这种阀只有 4 个端口，但必须通过左右两个分别注明这四个端口的方框来说明阀的不同位置。图中的阀体的端口被分别定义为 P、T、A 和 B，其中 P 代表与压力源相连接的端口，T 代表与油罐相连接的端口，而 A 和 B 代表阀的输出口。图中阀右侧显示的是一复归弹簧，只有一个方框（位置）的端口被注明，这个被注明的阀的位置被称作初始阀位，即表示阀不带电时候的换向阀状态。在图 5-46 中，右侧受弹簧控制的端口被标明，所以该阀的弹簧侧方框表示的是其初始阀位。虽然图左侧方框的端口没有说明，但其与右侧端口具有相同的字母表示。

图 5-46 所示的双位阀的每个方框代表一个位置，每个方框内的连线表明了滑动阀芯是如何连接各端口来确保液压油按照正确方向流动。当换向阀被左侧的电磁阀激活时，压力端口（P）就会与端口 B 连接，而油罐端口（T）则与端口 A 相连接。当换向阀未被激活时，滑动阀芯在右侧弹簧的作用下移动到右边，右侧方框所表示的连接方式成为有效状态。从图中可以看出，当滑动阀芯被弹簧牵拽到右边时，端口 P 连接到端口 A，端口 T 连接到端口 B。

双位换向阀内部的工作情况如图 5-47 所示。滑动阀芯在设计上保证一部分是被切除的，以便于液体能够在该部分流通，而其他部分则为全尺寸以阻断液体流通。当滑动阀芯的位置移动时，被切除的部分对准两个端口，液压油从这两个端口流动。当滑动阀芯其他（未切除）部分对准这两个端口时，液压油不能在这两个端口间流动。该图还表示了双位四端换向阀的滑动阀芯移动到右侧时，液压油在端口 B 和压力端口（P）以及端口 A 和油罐端口（T）之间流动的情况。图 5-47b 表示了当滑动阀芯移动到左侧时，端口（P）和端口 A 以及油罐端口（T）和端口 B

之间液压油流动的情况。图 5-48 为换向阀的剖视图，从中可以看到滑动阀芯和阀体的内部结构设计。

图 5-49 为三位四端的手动换向阀。该换向阀有 3 个明显的位置，滑动阀芯在其中移动时可以改变液压油流动的方向。该图 3 个方框分别表示了换向阀的 3 个位置：图的左边方框表示了左边的操作机构被激活时阀内的连通情况，方框中的箭头标明了压力端口（P）连接到端口 A，同时端口 B 连接到油罐端口（T）；当阀门右侧的操作机构被激活时，通过换向阀的液压油反方向流动，压力端口连接到端口 B，端口 A 连接到油罐端口（T）；当换向阀均未被左边或者右边的操作机构激活时，在弹簧作用下滑动阀芯处在中间位置，此时 4 个端口都被堵塞。图 5-50 所示为杠杆操作型三位换向阀的剖视图。从图 5-49 的符号上看有两个杠杆（左、右侧各一个），但实际上如图 5-50 所示只有一个杠杆，它可将滑动阀芯移动到任一位置。

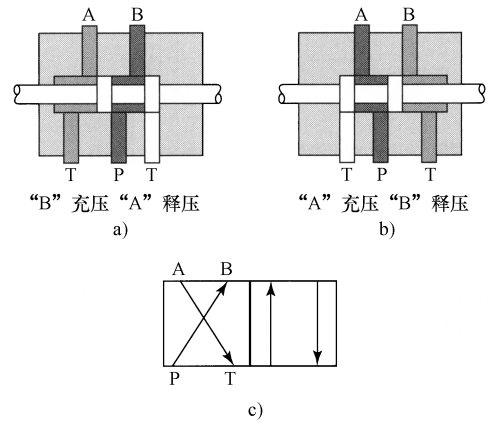


图 5-47　换向阀端口之间的内部连通模式
a）压力端口与端口 B 连通时的滑动阀芯位置
b）压力端口与端口 A 连通时滑动阀芯的位置
c）换向阀符号，左侧位置框代表压力端口与端口 B 连通，右侧位置框代表压力端口与端口 A 连通

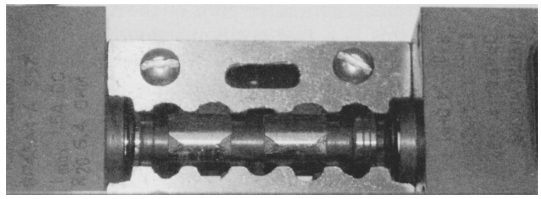


图 5-48　换向阀的剖面图

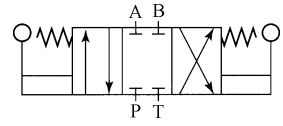


图 5-49　三位四端手动换向阀

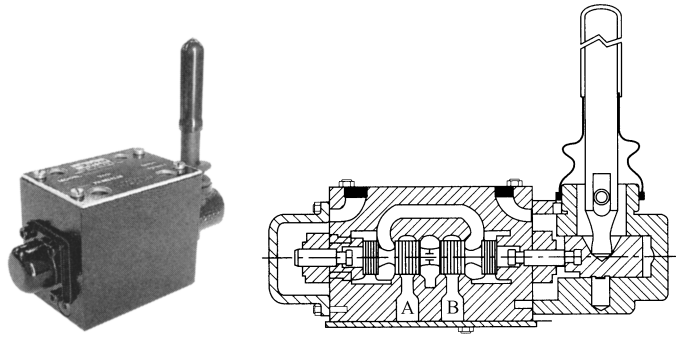


图 5-50　杠杆操作型换向阀及其剖视图（图片来源：Parker-Hannifin Corporation）

5.29.4 不同类型的液压阀执行器和换向阀连通模式

液压阀有很多种不同类型的执行器，包括按钮、滚子和锁定式按钮等。图 5-51 为这些执行器的符号，液压阀执行器有时也被称为阀门操作器。

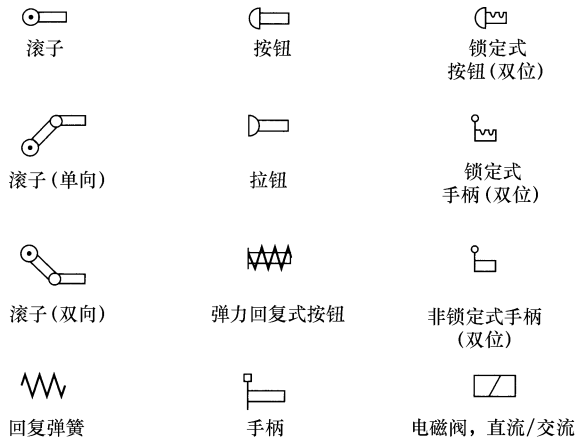


图 5-51 液压阀门执行（操作）器的符号

换向阀可以有两个、三个或四个端口，也可以由一、两个或三个位置，图 5-52 显示的是三端换向阀的常见连通模式，图 5-53 给出的是一组四端换向阀的常见连通模式。虽然有时无须选择换向阀的端口类型，但在更换换向阀时候必须清楚有多种类型可供选择。

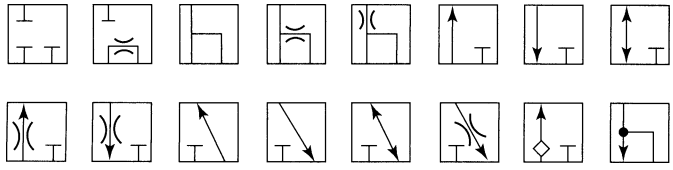


图 5-52 三端换向阀的常见连通模式

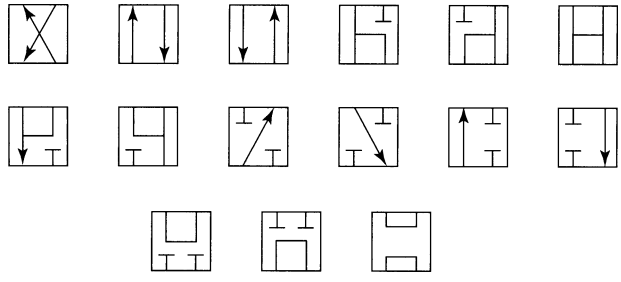


图 5-53 四端换向阀的常见连通模式

5.29.5 先导式液压阀

有些液压系统的换向阀太大，难以通过操纵杆和电磁线圈操控，操控这些大型阀门的一种方法就是采用先导液压力。在液压系统图中，先导压力线路通常用虚线

描述，先导液压系统的压力可通过减压阀从主液压系统获得，也可以从专门的小型辅助液压泵中获得。图 5-54 所示为先导换向阀，图 5-55 所示的是一个采用先导换向阀的液压系统图。在图 5-54 中，位于阀组底部的是一个大型阀，其阀芯通过先导压力驱动和控制，而先导压力是由一个直接安装大型阀上部的一个小型换向阀来控制的，有时候先导换向阀也被称作“主从式换向阀”。在图 5-55 所示的液压系统中，可以看到一个与大型液压缸连接的大换向阀下方的小换向阀。当小换向阀的操纵杆移向左侧时，先导压力系统的辅助液压油便流经小阀流向大阀左侧的先导控制部分，当先导液压油到达大阀的先导执行器时，将产生足够大的压力来迫使大换向阀的阀芯移动，控制液压缸内的连杆伸展；如果小换向阀的操纵杆移向右侧，则先导压力会被导向大阀右侧，从而起动大阀的阀芯移动使液压缸内的连杆回缩。

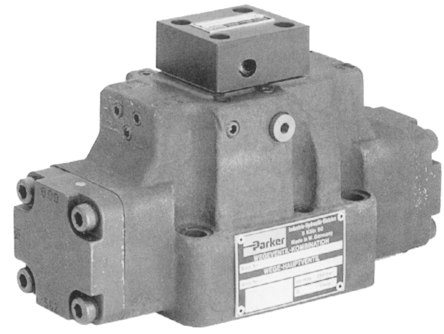


图 5-54　先导换向阀（图片来源：Parker-Hannifin Corporation）

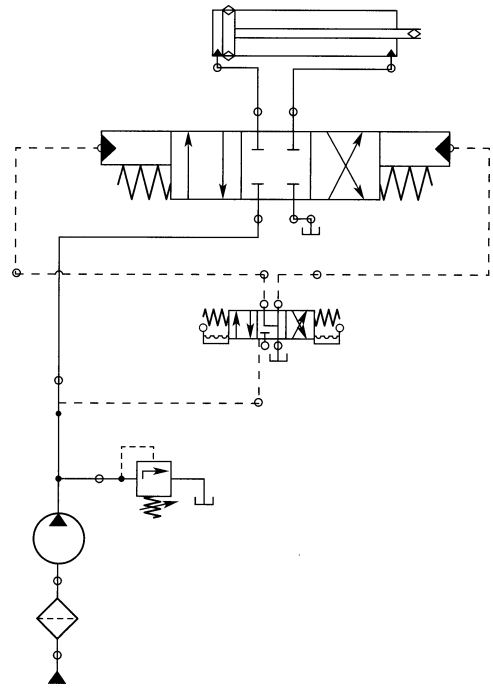


图 5-55　带有先导换向阀的液压系统，先导压力系统用虚线表示

5.29.6　插装阀

在风力机液压系统中另一种应用广泛的液压阀是插装阀。插装阀可以用来进行方向控制、压力控制和流量控制。与前面述及的液压阀不同，插装阀是被安装到液压集成块上而不是作为一个孤立的单元使用。将其安装在液压集成块上的做法限制了阀门各种类型和程度的泄漏现象的发生，同时也使结构更加紧凑。图 5-56 所示的是液压集成块及安装在其上面的插装阀，图 5-57 所示的是带有插装阀的液压系统。每个插装阀在靠近底部的侧面有一个主输入口，在底部有一个输出口，而在阀体上部则有一个辅助端口。当辅助端口被施加压力时，会使插装阀的内部结构转换到关闭状态；如果要使其处于开放状态，则必须除去辅助端口的压力，使插装阀对于由侧面主输入口进入的液压油呈导通状态。图 5-57 表示了一个

具有四个插装阀的液压系统。当手动阀杆动作使液压缸伸展时，换向阀会减小伸展插装阀门 1 的先导压力，从而使其处于完全导通状态。当插装阀导通时，可以允许足够的液压油流经它进入液压缸，从而使连杆伸展。同时，伸展插装阀 2 的先导压力消失，使此阀导通并使液压油从液压缸另一端流向储油罐。当所有两个伸展插装阀都打开的时候，液压油的压力使液压缸内的连杆伸展。换向阀同时也向图左侧的回缩插装阀 2 的辅助端口提供液压，这样可以阻止油通过此阀返回油罐。回缩插装阀 1 也接受先导压力保持关闭，以保证主压力不会到达液压缸的连杆端。当插装阀的辅助端口上出现先导压力时，此压力和内部弹簧共同作用会使插装阀复归到关闭状态从而使连杆停止运动。

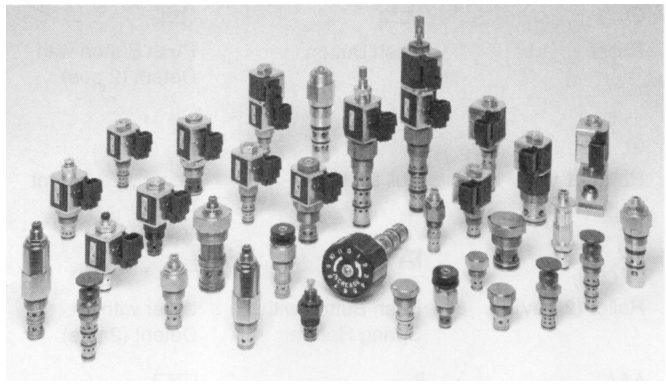


图 5-56　液压集成块和安装在上面的插装阀

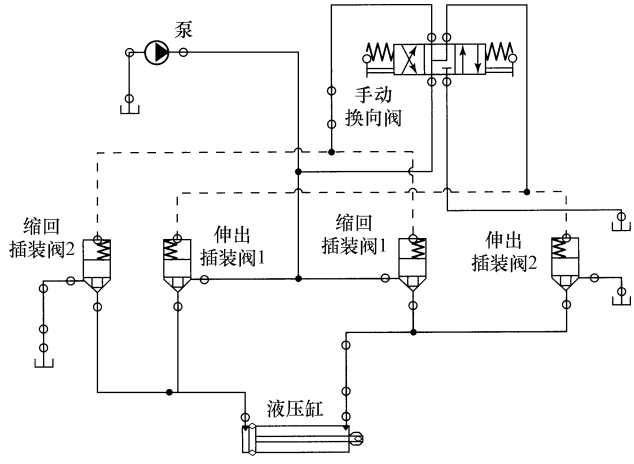


图 5-57　带有插装阀的液压系统

当手动换向阀移动到收缩位置时，先导压力被送到收缩插装阀 1，它开启并把全部的先导液压油输送到液压缸的连杆端部。同样的先导压力也被送到收缩插装阀 2，它开启并允许液压油从液压缸的另一端流回储油罐。即当两个收缩插装阀都导

通的时候，液压缸连杆就会缩回。

5.29.7　压力控制装置（减压阀）

液压系统需要对系统中的压力进行不同的控制。液压泵向系统内输入液压油，当液压油被压缩时，其压力就升高，而当液压油流回到没有压力的储油罐时，系统压力就又会降低。压力控制装置允许多量或少量的液压油绕开（旁路）系统流回到储油罐中去，因为可以减少系统中的压力，压力控制装置也称为减压阀。

图 5-58 给出了减压阀的符号。从图可以看出，当压力超出范围时减压阀的减压功能是通过弹簧张力和对内部液压油流向控制实现的。符号中弹簧上的斜箭头表示了这是一个可调式减压阀。图 5-59 是一个实际的减压阀，从图上可以看到减压阀上有个手柄，通过这个手柄可以手动调节弹簧张力。当手柄顺时针方向扳动时，弹簧张力增加，通过减压阀旁路之前的液压油的压力就会增加。当手柄逆时针扳动时，压力设定降低。减压阀的弹簧张力平衡液压油的压力，因此弹簧张力如何设定决定了系统压力，超出的压力通过将部分液压油泄放回储油罐而得到释放。

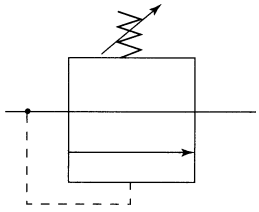


图 5-58　减压阀符号

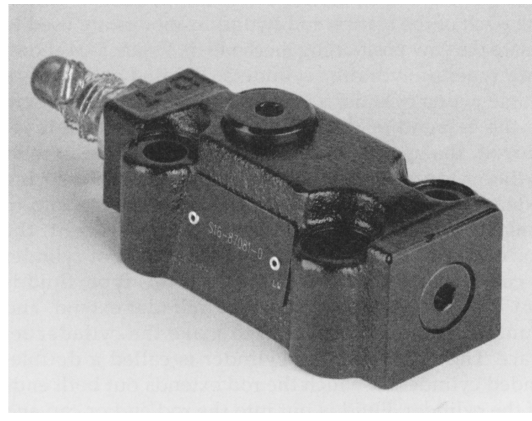


图 5-59　减压阀（图片来源：Parker-Hannifin Corporation）

5.29.8　流量控制阀

液压系统中的液压油可以被计量以控制液压缸连杆的移动速度。当液压缸伸张或收缩时，流量控制阀可以通过对系统的不同部分做出微小调整来平衡运动部件的速度。图 5-60 左侧为一个固定流量阀的符号，而右侧有一个斜箭头穿过的符号则表示了这是一个可调的流量阀，即流量控制阀。流量控制阀的符号看起来就像是液压管路被挤压而起到限流效果。流量控制阀和它所控制的元件是串联在一起的，这说明不论流量控制装置中的流体为什么类型，它与通过液压缸或液压马达的流体是一样的，因为串联方式下只可能有一个通道。在风力机中流量控制阀被用来控制一些执行机构的动作速度，例如叶片节距调节装置、机舱偏航调整装置。

图 5-61 是一个与单向阀并列连接的流量控制阀，左半部分是一个固定流量控制阀，右半部分是一个可调流量控制阀。单向阀阻止液压油向一个方向流动并强制

所有的液压油流经流量控制阀，这就允许了液压油通过流量阀来控制。当液压油反向流动时，单向阀的阀芯离开阀座，并允许液压油完全绕开流量控制阀，即当液压油在相反的方向时可以绕过流量控制阀而流入单向阀。当这些流量控制阀和单向阀中组合使用时，就可以控制液压缸的伸张或收缩的速度。

图 5-62 液压回路中的流量控制阀和单向阀共同实现对液压缸的控制。液压缸左边的流量控制阀控制流入液压缸端盖处的液压油量，也就控制了液压缸连杆的伸展速度。液压缸右边的流量控制阀和单向阀则控制着液压缸连杆收缩速度。这种“流量控制阀 + 单向阀”的形式被称为“meter in control”。如果在回路中单向阀的方向是相反的，则被称为“meter out control”，即左边流量控制调节连杆收缩速度，而右边流量控制调节连杆伸展速度。

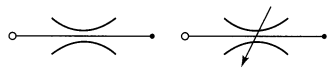


图 5-60 液压流量控制阀符号。第二个符号中斜箭头表示流量是可控的

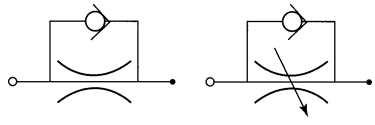


图 5-61 带有单向阀的流量控制阀符号

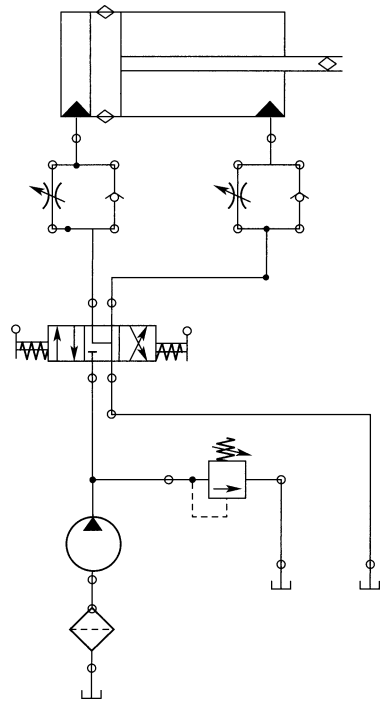


图 5-62 控制液压缸连杆移动速度的流量控制阀和单向阀

5.30 基于液压电磁阀的电气控制

电磁线圈是由导线缠绕而成的，当两边施加电压和有电流通过时，会产生很强的穿过线圈的磁场。当电磁线圈用于操控液压缸时，强大的磁场吸引金属电枢而使阀芯移动。当换向阀的阀芯移动时，就改变了端口的连通方式。电磁阀上有一个作用在阀芯上的弹簧，当电磁线圈突然断电磁场消失时，在弹簧作用下阀芯恢复到初

始位置。在液压系统中，电磁阀可以用于控制流向、压力和流量。

图 5-63 显示的是电磁线圈符号，这个符号的特点是一个矩形内穿过一条斜线。很多种类的液压元件可以通过电磁线圈控制，因此这个符号被添加到液压元件符号中就表示此元件是用电磁线圈控制的。由于电磁阀采用电气控制，所以 PLC 控制器可以很轻易地控制液压阀的开关，为风力机提供很好的控制。

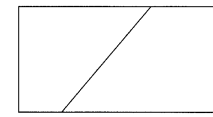


图 5-63　电磁线圈符号

5.31　液压缸和液压马达

在每个液压系统中，作为执行机构的液压缸和液压马达分别把储存在液压油中的能量转换为直线运动和旋转运动。

5.31.1　液压缸

在风力机的液压系统应用中，液压缸用来控制叶片节距，而液压马达则用来调整偏航位置。图 5-64 为四种类型的液压缸。第一种液压缸是一种有弹簧回复的单向动作液压缸，工作时液压油被传送到液压缸端盖处使连杆伸展；当液压油返回时，弹簧会将连杆弹回。第二种液压缸为带有弹力牵引的单向动作液压缸，这种液压缸通过将液压油注入到液压缸连杆端处使连杆缩回；当没有液压油注入时，弹簧就会将连杆弹出使其伸展。第三种液压缸被称作双向动作液压缸，在这种液压缸中，液压油被注入液压缸端盖处时连杆伸展，而液压油被注入液压缸连杆端处时连杆收回。第四种液压缸被称作双端液压缸，在这种液压缸的连杆伸展出液压缸的两端，液压油被注入右侧或左侧时分别使连杆向左或向右移动。

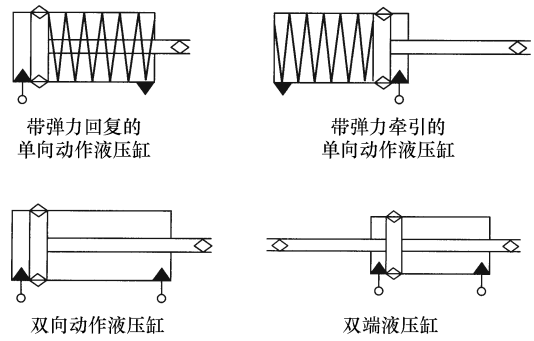


图 5-64　四种类型的液压缸

图 5-65 所示的是液压缸的剖视图，液压缸上有密封装置来确保液压油不会从液压缸连杆周围泄漏。当液压缸连杆伸展时，密封圈会变形确保液压油不泄漏；当连杆改变方向返回时，密封圈朝另一个方向变形起到密封作用。

5.31.2 液压马达

在液压油流过液压马达然后返回到储油罐的过程中会驱动液压马达的轴旋转，液压马达将流体能量转换为旋转机械能。液压回路中的流量控制阀能控制流过液压马达的液压油流量，从而控制其转速。液压马达可以被用作偏航控制系统的机舱位置调整执行器。图 5-66 显示的就是一种液压马达，有一个液压油流入口和一个流出口。如果改变液压油流过液压马达时的方向，轴的旋转方向就会逆反。液压马达的轴上设计有花键，所以能方便与齿轮箱相连接，把转换来的能量传递至偏航系统的大齿圈。

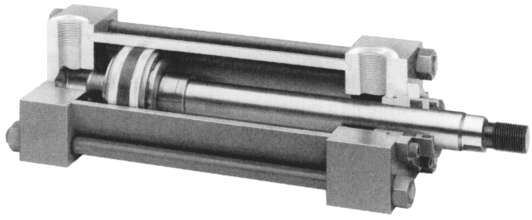


图 5-65 液压缸的剖视图
（图片来源：Parker-Hannifin Corporation）

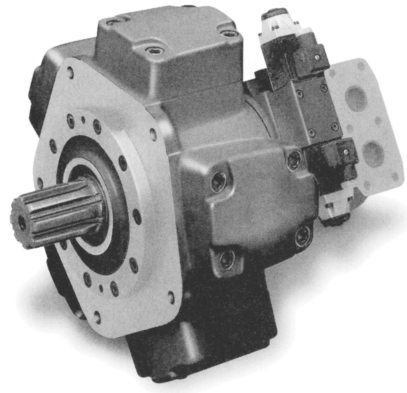


图 5-66 液压马达（图片来源：Parker-Hannifin Corporation）

5.32 液压比例控制阀

前面章节阐述的液压缸体有只有两种位置——完全伸展或者完全缩回，而一些液压应用中需要液压缸能够位于完全伸展和完全收回之间的某个位置上。一个简单的例子就是通过开关控制的灯，因为灯仅仅是开或关，这种简单的控制叫作开关控制。而与开关控制不同的比例控制类似于灯的调光开关，调光开关可以调整灯光到 10%、20%、50%、75%，也可以调到 0% 或者 100%。另外一个比例控制的例子是厨房水池的水阀，通过调节水阀的开度能控制水的流量。

在液压系统中，比例控制允许执行器或者控制阀工作在 0 ~ 100% 之间的任何点上。比例控制用在叶片节距调节系统时，叶片节距可以按照需要设置为 0 ~ 100% 之间的任何数值。例如，为了捕获更多的风能，需要把叶片节距设置为 20% 时，液压比例控制就控制液压缸伸展到 20%。如果风速变化，叶片节距需要改变为 50%，比例控制器会相应地调整液压缸到 50%。

当液压马达用来驱动风力机机舱的偏航机构时，就可以采用比例阀来控制液压

马达的旋转速度和方向。PLC 或者计算机向比例阀提供一个 0 ~ 100% 的电气设置信号。比例阀实际上是一个具有更精密的阀芯和更强大线圈的电磁阀，比例阀通过其线圈接收 0 ~ 10V 的电压信号或者 4 ~ 20mA 的电流信号来控制阀芯的位置。因为需要改变线圈的电压或者电流，所以需要在液压比例阀和 PLC 或者计算机之间采用一个用来传递电气信号的电子放大器。

图 5-67 为液压比例阀，图 5-68 为控制液压比例阀的电子放大器，图 5-69 显示的是液压比例阀的符号。在液压比例阀符号中，电磁线圈标志上的箭头表示了电磁阀需要接收变化的电压与电流。

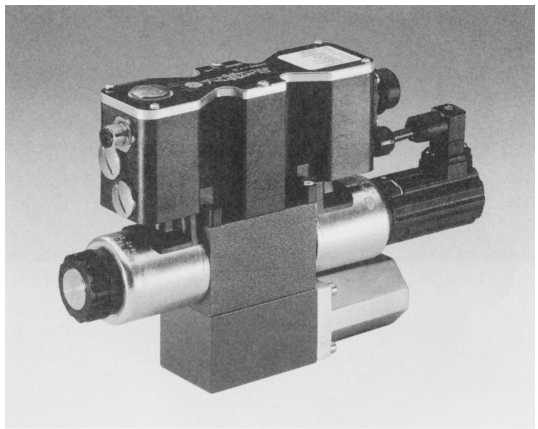


图 5-67　液压比例阀
（图片来源：Bosch Rexroth Group）

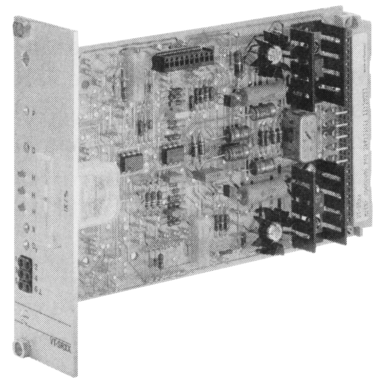


图 5-68　控制液压比例阀的电子放大器
（图片来源：Bosch Rexroth Group）

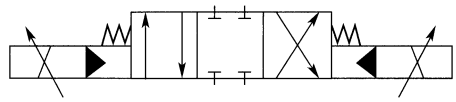


图 5-69　液压比例阀的符号，注意在每一侧线圈符号上的箭头

5.32.1　典型的电压信号和电流信号

表 5-2 列出了液压比例阀的典型电压信号和电流信号。表中电压范围是 0 ~ 10V，电流范围是 4 ~ 20mA。表中显示了 10% 的数值增量，如果需要的话两种信号均可以提供 1/1000 的精度。分辨率和精度越高，系统成本越高。电压信号系统和毫安信号系统是类似的，主要的不同点是毫安信号系统提供 4mA 的偏移，这意味着 4mA 对应着零信号。如果系统的一根电线或者放大器损坏，电流信号会变为 0mA，系统将其理解为无效信号。但是电压信号系统中用 0V 作为最低电压，所以依据它不能分辨一条线路是否断开。

表 5-2 比例电压和电流信号

百分比(%)	电压/V	电流/mA
100	10	20.0
90	9	18.4
80	8	16.8
70	7	15.2
60	6	13.6
50	5	12.0
40	4	10.4
30	3	8.8
20	2	7.2
10	1	5.6
0	0	4.0

5.32.2 方向和流量的比例控制

比例换向阀能调整其内部的阀芯从 0 ~ 100% 的位置变化，也就连续调整了阀门的开度。这意味着换向阀也能用于控制通过阀门的液压油流量，即比例换向阀不但能够控制方向，也能控制流量。如果比例换向阀同时用于方向和流量控制，则流量控制符号会出现在阀门符号内。这大大简化了系统，因为一个阀门既可以控制方向也可以控制流量。如果流量被设置为 75% 来驱动液压缸或者液压马达，则比例换向阀首先切换到正确方向，然后调整到 75% 的开度。如果液压缸或者液压马达需要以相反方向运行在 50% 的速度，比例换向阀就会转换到另一方向然后调整到 50% 的开度。

5.32.3 压力的比例控制

另外一种比例液压阀是比例压力控制阀（简称比例压力阀）。在风力机的液压系统中，一个比例压力阀可以用作卸压阀、压力顺序阀或者减压阀。图 5-70 是比例压力阀的符号，其主要部分是压力阀，它有一个弹簧控制、一个可变电磁线圈控制和一个电磁线圈控制。穿过电磁线圈的箭头表示压力控制阀是可调的，改变线圈的电压或电流就可对其进行调整。PLC 通过风力机内部的系列传感器检测各类信号，然后给比例压力阀发送一个可变电压或电流信号，为系统设置液压压力。当需要更多转矩或功率时，可通过调整发送给比例压力阀的电压或电流向上调整系统压力。

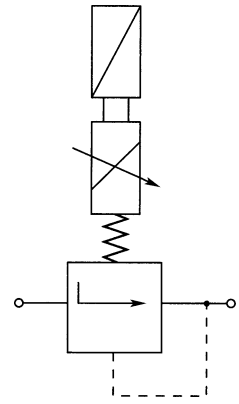


图 5-70 比例压力阀符号

5.32.4 液压伺服控制阀

液压伺服控制阀就是在阀体内装有一个反馈传感器的比例阀。当比例压力阀接收到一个电压或毫安信号时，它作为一个开环控制器动作，因此信号传输给比例压力阀后它将按一定的百分数动作。当在比例压力阀中添加一个反馈传感器后，将使

其变成一个闭环运行的伺服阀，它用传感器测量阀芯的位移量并将信息反馈给放大器，由放大器调整电压信号使阀芯位移更加准确，这会使液压控制更加精确。伺服阀比简单的比例压力阀具有更高的压力和流量控制精度，同时由于反馈的特征，伺服阀比一般的比例压力阀反应更快速。反馈传感器使得伺服阀可以根据设定位置来检验其实际位置，并能快速调整至正确位置。借助于液压伺服阀，叶片节距调节系统和机舱偏航调节系统可实现对风力机的连续控制，使风力机以尽可能高的效率运行。

图 5-71 是一个液压伺服阀，图 5-72 是液压伺服阀的符号。注意阀体左侧操作框内的符号：左边向右指向的箭头表示设定值，底部向上指向的箭头表示反馈符号，右侧向右指向的箭头表示输出的伺服信号。注意表示位置的左侧方框内的箭头线上有流量控制符号，这表示该伺服阀可同时作为换向阀和流量控制阀工作。

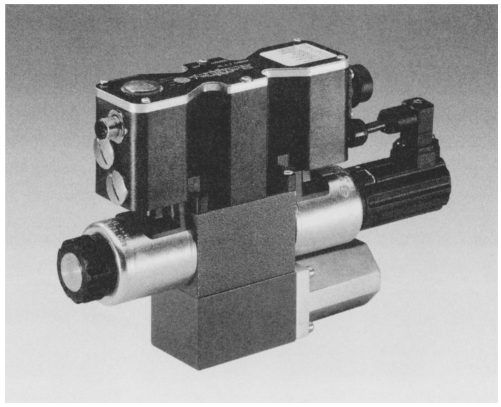


图 5-71　一个液压伺服阀
（图片来源：Bosch Rexroth Group）

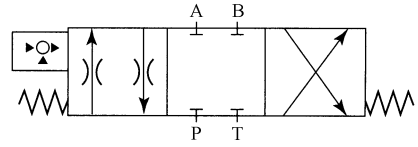


图 5-72　液压伺服阀符号

5.33　风力机的制动器

风力机在很多情况下需要控制叶片的旋转速度。首先，如果维修叶片、齿轮箱或发电机，叶片必须锁定到固定位置以防止发生转动。如果风速超过安全速度或者电力负荷突然减小，制动器（制动装置）必须能够动作。除此之外，偏航系统也需要类似控制，只要当机舱指向最佳位置后，或者为了维修需要锁定偏航时，都要起动偏航制动器。本节介绍风力机的机械制动和液压制动的原理。在一些小型风力机上，制动器由弹簧和机械系统控制，而在一些大型风力机上，制动器则由液压系统控制。

大型风力机可在三个主要位置实施制动，图 5-73 表示了风力机的基本组成部分和制动器的安装位置。图中，第一套制动器是位于偏航内齿圈的偏航制动器，偏航制动器在偏航机构中设置了一系列的联锁销以保证机舱不能移动，当偏航机构需要动作时，则拔出联锁销以允许机舱移动。小型风力机上，偏航制动器多为卡钳式

制动器，这种制动器常态下承受弹簧拉力而起作用，当液压系统动作并克服制动器上的弹簧压力后，卡钳打开偏航机构可以工作。当偏航机构将机舱移到期望的位置后，卡钳的液压释放，弹簧压力将卡钳拉回至原来与偏航齿圈接触的位置。当制动器起动后，将会减少偏航运动系统的一些应力。这些钳式制动器类似于汽车前轮的卡钳和制动片。当偏航控制需要重新移动机舱时，制动器释放，在风向不断转变时，制动器需要起动和释放多次。

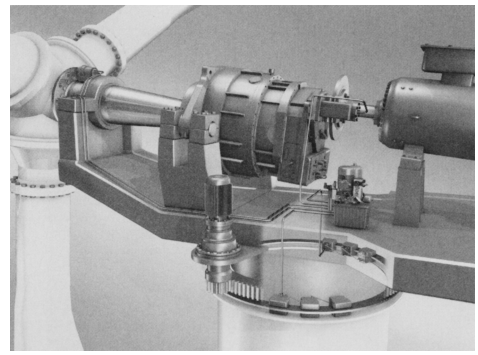


图 5-73　传动链和偏航制动器
（图片来源：Bosch Rexroth Group）

图 5-73 所示的另一组制动器是直接安装在风力机前方轮毂之后的转子上的制动器，该制动器也是卡钳式制动器。还有一组制动器安装在齿轮箱和发电机之间的高速轴上，高速轴上安装有一个大转盘和卡钳式制动器，卡钳动作时可以卡紧转盘实现制动。当要起动制动使叶片旋转停止时，直接装到叶片后面转子盘上的制动器和装到齿轮箱和发电机之间高速轴上的制动器同时动作。当齿轮箱传动处于停止状态时，也要起动高速轴上的制动器。

图 5-74 是小型风力机的转子盘上的卡钳式制动器，卡钳加紧时与转子盘产生接触摩擦，就好像汽车前轮上的盘式制动器。转子圆盘提供一个很大的平面，这样刹车片可以产生足够的摩擦使转轴停止转动。图 5-75 显示了一个能够控制卡钳释放的液压缸及其连杆。平时制动器由大型弹簧保持在制动位置，当需要释放卡钳使

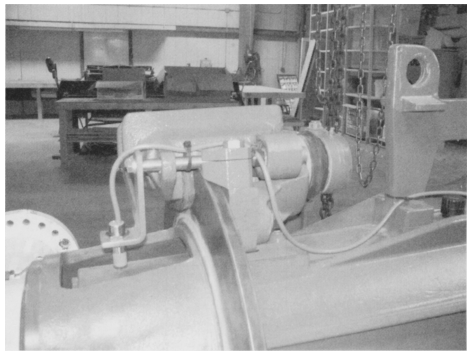


图 5-74　转子卡钳式制动器

图 5-75　控制卡钳的液压缸：卡钳由大型弹簧保持在锁定状态，当液压杆伸展时卡钳释放

转子旋转时，液压缸的连杆向上伸展移动卡钳到释放位置。

5.33.1　液压制动器

一些风力机上使用液压系统来控制制动器，因为靠弹簧力保持制动器处在制动位置，所以这种制动器被称为失效保护型制动器。液压系统用于释放制动器，所以如果液压失效，丧失所有液压压力情况下，弹簧自动将制动器恢复到制动位置，起到失效保护的作用。当需要释放或解除制动时，液压油将会驱使液压连杆伸展，制动器卡钳机构会移动一段很小距离来松开制动盘。当移除液压油压力后，强劲的弹簧力使制动器的制动片重新复归原位，靠在转子圆盘上产生摩擦力使转子停止转动。因此不论什么原因的液压压力丧失或失效，在弹簧力的作用下制动器会自动起动。制动器垫片和转子圆盘间的距离为一个很小的值，通常小于 1/2in。因为这个距离非常短，制动器可以迅速作用使转子快速停止。液压系统采用换向阀、流量控制阀和压力控制阀来保证液压系统正常工作，在需要解除制动时将制动器释放以允许转子转动。液压压力可由一个比例或伺服液压系统实现精确的控制。

5.33.2　机械制动器

小型风力机可能没有液压系统，而是通过机械方式实现有效制动。这些制动器也采用失效保护方式，意味着制动器中弹簧一直提供压力，除非风力机叶片需要旋转。当风足够吹动叶片旋转时，一个凸轮会动作于制动器使之释放，解除作用到转子上的夹紧力，允许叶片旋转。如果风速降到低于允许叶片转动的最小风速时，凸轮移回且弹簧重新控制制动器。如果风力机上产生任何问题，弹簧总能引起制动器工作，防止叶片转动或实现超速保护，所以这也属于失效保护制动模式。

5.33.3　机械驻车制动器

当实施维修必须保证叶片安全，或者需要保护叶片不受强风损坏时，风力机需要一个驻车制动器将叶片锁定到固定位置。驻车制动器可能是一个独立的制动器，也可能属于制动系统的一部分。职业安全与健康协会（OSHA）要求在风力机上安装驻车制动器，以便在需要时实现叶片锁定。驻车制动器也可以被设计为失效保护方式，以保证发生故障时，叶片能快速停止或者被控制在一个安全的工作区域内。

5.33.4　动态制动

另一种控制风力机速度的方法是动态制动，动态制动通过将发电机输出的能量输送到一个电阻型负荷而使发电机负荷增加、转速降低的过程。发电机产生的电力可以用来为蓄电池充电或带动任何电气负荷，流过发电机的电流在发电机转轴上产生的电磁阻转矩会持续阻止发电机旋转，相应地，该阻转矩也会试图阻止高速轴、低速轴以及叶片的转动。输入的风能试图使叶片转动，而发电机电磁阻转矩则试图使叶片停止转动，在两部分作用下，系统达到一个平衡状态，发电机在此平衡状态下，以合理的速度旋转并发出电能。

当风速变化范围较大时，可以采用同样的原理控制风力机的速度。比如，如果风力强劲而电力负荷正处于用电低峰期，发电机产生的电磁阻转矩减小，叶片的速

度开始增加并越来越快，最终叶片的转速会超出安全范围。当这种现象发生时，需要起动机械制动器，或者采用动态制动。动态制动系统会在发电机输出电路中增加一个被称为电阻箱的小电阻型负荷，当发电机工作时该电阻会像正常的电力负荷一样增大发电机负荷。电阻负荷会使发电机轴上的电磁阻转矩增加，从而将风力机叶片速度降到安全值。当电力负荷恢复正常时，移除电阻负荷，将发电机的所有电力输出都输送给正常负荷。

当将电阻负荷放置在发电机电路中后，因为它消耗电流而产生大量的热量，所以如果使用动态制动，必须提供一种冷却负荷箱内电阻的方法。如果风力机为电网供电时，上述问题很少发生，因为电网负荷相对稳定。如果风力机用于给蓄电池充电或者为民用或小型商业提供电能，出现的问题会多一些，在这种情况下要经常采用动态制动实现小负荷情况下的叶片超速保护。

简 答 题

1. PLC 扫描程序的四个阶段是什么？
2. 工程师如何利用 PLC 判断输入开关或输出线圈的工作是否正常？
3. 输入模块中每一个输入电路都有一个状态指示器，那么在检修中如何使用状态指示器？
4. 在 PLC 中，内部控制继电器是什么？它和硬件继电器有什么不同？
5. 如何操作液压流量控制阀、换向阀和压力控制阀？
6. 描述一下 PLC 的四个组成部分。
7. 如何操作比例液压阀？
8. 识别水平轴风力机的基本组成部分。
9. 为什么需要调整风力机叶片的节距？
10. 水平轴风力机的制动装置安装在什么地方？

选 择 题

1. 锁存型线圈（　　）。

a. 当功率中断后保持原有的状态

b. 当功率中断的时候被封闭复位（关闭）状态

c. 需要在相同位置的非锁存型线圈使它关闭

d. a 和 c

2. 对一个 PLC 来说，模拟信号（　　）。

a. 表示 0 ~ 100% 之间的值

b. 只是开/关信号

c. 总是 110V
3. 液压比例阀（　　）。
a. 是开/关阀
b. 是 0 ~ 100% 阀
c. 允许液体向一个方向流动
4. 当 PLC 处理器在运行状态时，（　　）。
a. 执行扫描周期
b. 不需要执行扫描周期
c. 无法区别处理器是否执行扫描周期
5. 液压伺服阀（　　）。
a. 是带有反馈传感器的比例阀
b. 允许液压油向一个方向流动
c. 为液压系统存储液压油
6. 闭环控制的基本组成部分有（　　）。
a. 反馈、过程变量、输入和感应器
b. 设定值、加法器、过程变量、控制器、放大器和输出
c. 输入、输出和数学算法
d. 以上所有
7. 机舱偏航位置的调整是为了（　　）。
a. 使叶片位置对风，保证获取最大风能
b. 当风力过大时使叶片位置不对风
c. 当风力机在检修时使叶片位置在风中固定
d. 以上所有
8. 风力机叶片可被调整（　　）。
a. 到最大位置用来保证在风速正常的情况下获取最大风能
b. 到最小位置用来在风速过速的情况下保护叶片
c. 到某个位置以便在风速很小的情况下维持转子旋转
9. PLC 中的镜像寄存器（　　）。
a. 提供 0 ~ 100% 的值
b. 保存输入和输出状态的副本，1 表示打开，而 0 表示关断
c. 保存输入和输出状态的副本，0 表示关断，而 1 表示打开
d. 以上所有
10. SCADA 系统包括（　　）。
a. 串联和并联控制数据采集
b. 监控中心区域数据采集
c. 监测控制和数据采集

第6章　发　电　机

本章学习目标

读完本章后你将能够：

- 辨别一台直流发电机的基本部分，并可以解释其工作原理。
- 了解如何改变直流发电机的输出电压。
- 阐述发电机如何通过电刷和换向器发出直流电。
- 区分串励、并励和复励直流电动机的不同。
- 认识三相交流电动机的基本构成并解释其工作原理。
- 解释旋转电枢和静止定子型交流发电机的工作原理。
- 解释旋转定子和静止电枢型交流发电机的工作原理。
- 理解为什么一台交流发电机需要集电环和电刷，而不是换向器和电刷。
- 明白交流电路中的正弦波形和频率的概念。

本章关键词

交流电压（AC voltage）
交流（Alternating current）
发电机（Alternator）
安培（Amps）
电枢（Armature）
异步交流发电机（Asynchronous AC generator）
电刷（Brushes）
换向器片（Commutator segments）
电流（Current）
直流电压（DC voltage）
直流（Direct current）
双馈感应发电机（Doubly fed induction generator）
电磁（Electromagnet）
磁力线（Flux lines）
频率（Frequency）
发电机（Generator）
地（Ground）
感应电流（Induced current）
感应发电机（Induction generator）
感应电动机（Induction motor）
叠层钢转子（Laminated steel rotor）
磁（Magnet）
磁线圈（Magnetic coil）
永磁式发电机（Permanent-magnet generator）
电阻（Resistance）
旋转磁场（Rotating magnetic field）
转子（Rotor）
自励发电机（Self-excited generator）
他励发电机（Separately excited generator）
转差（Slip）
集电环（Slip rings）
笼型转子（Squirrel-cage rotor）
定子（Stator）
同步交流发电机（Synchronous AC

generator）

三相发电机［Three-phase generator（alternator）］

三相电压（Three-phase voltage）

转矩（Torque）

伏特（Volts）

绕线转子（Wound rotor）

本章概述

风力机的叶片和风轮通过转轴连接到交流或直流发电机上。从定义上讲，发电机是一种通过轴的旋转把机械能转换成为电能的装置，这种电能可以是直流电或者交流电，而交流发电机是一种只能将能量转换为交流电能的装置。风力发电机可以作为一台独立的发电机为家庭或小型企业提供交流或直流电能，或供给蓄电池组储存电能以供将来使用。风力发电机也可以连接电网，此时就像任何一个以燃煤或核能为动力的发电厂，它可以产生任何频率的电压，通过变流器转换成 60Hz 的交流电送入电网。

本章将介绍发电机如何通过轴的转动来发出交流或直流电。首先从概述电磁铁和电磁理论开始，讲述了简单的直流发电机和复杂的交流发电机的工作原理，同时介绍了发电机每个基本部件的工作原理。直流发电机和交流发电机都是能量转换器，通过机械驱动转轴旋转产生电能。

为了能够充分了解交、直流发电机的所有部件和工作原理，本章对交、直流电动机的基本运行原理和所有电机部件的名称、功能进行了回顾，讲述了串励、并励、复励和永磁式直流电动机的不同之处，以及交流感应电机和同步电机之间的不同。本书以电动机为例讲述，因为电动机和发电机在运行原理和控制方法上有很多相似之处。事实上，有很多时候人们简单地称交流和直流发电机为电机，因为在给该机器供电时它可以运行在电动状态，而驱动其轴旋转时它又运行于发电状态。

6.1　交流电与直流电概述

在开始学习交流电和直流电之前先了解一些基本的电力术语，诸如电压、电流、功率及其单位。在刚开始学习电的知识时，这些词经常被使用。电流定义为电子的流动，单位是安培，通常简称为安。电压是指驱动电子流动的“力”，单位是伏特，通常简称伏，电压越高，电流传输的能力就越大。功率表示一个电路中电能传输的等级和大小，由通过电路的电流乘以电压计算得到，其单位是瓦特。

学习电磁理论前，先复习交、直流电流和交、直流电压的概念。直流指电流只向一个方向流动，电池组就是一个很好的直流电源，当电池组放电时，带有负电荷的电子从负极流出，经过回路最终流回正极。在一些应用领域，如汽车电力供应，传统上认为电流的流动方向是从正极流向负极。这种被称之为“传统电流方向”的电流描述方法被广泛采纳，其原因是汽车电气系统只有一个正极端，并且采用车体金属框架作为负极端，也就是“地”。因为有一个正极端和多个负极端，电路中

的电能很容易被理解为从正极出发，流经电路最后到达电源负极的某一点。电子的流动形成电流，而电子带负电荷，因此电流实际上是从电池的负极流向正极。需要记住的最重要的一点是，直流电源中的电子流动只有一个方向。

6.2 “交流”的含义

在交流电路中，按一定方向流动的电子会在某一时间改变为相反方向流动。最能描述电子移动的是其特征波形，即如图6-1所示的正弦波。正弦波有一个正半周期和一个负半周期，正半周期和负半周期内的电流方向相反。

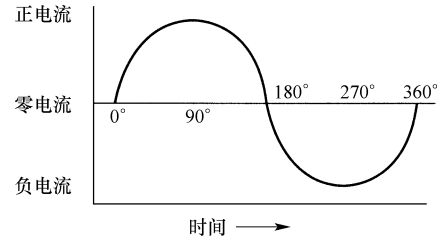


图6-1 移过360°的交流正弦波

6.3 交流电的频率

60Hz的交流电是在1/60s内由一个正半波和一个负半波构成的正弦电流（压）波来描述的，这个正、负变换的速率称为频率，也是交流电不同于直流电最重要的特点。频率是指电流从正方向变换为负方向的变换速率。在交流电中，电流先以正方向流动，然后变换为相反方向，原因是它是由一个先以一个方向而后以另一个方向做切割磁场运动的导线产生的，其实现方式是将导线做成线圈的形状嵌入旋转轴上，当转轴旋转时线圈中的导线也随之转动。当轴转过0°～180°的角度时，导线切割磁力线并一定的方向切过磁场；当转轴继续转过剩余的180°～360°角度时，导线就会以反方向切过磁场，感应出的电子就会以相反的方向流动。当转轴不断旋转时，上述循环过程将会持续，感应出的电流将一会儿正向运动，一会儿反向运动。美国和北美洲其余大部分地区交流电压的典型频率是60Hz，这个频率是由交流发电机发电时转子的旋转速度决定的。频率可以通过计算1s内循环正弦波的个数得到，图6-2显示了1s内正弦波的数量。

一个正弦波周期是指正弦波从过零点开始经过360°再次到达过零点的持续时间，如图6-3所示。一个周期代表了一个完整的循环，也就是交流发电机一个完整的旋转过程。因为发电机转轴旋转一周就产生一个完整的正弦波，所以我们将周期等同于360°，因此也可以说正弦波的周期是360°。从图6-3中可以看到，正弦波开始于从0°，在90°时达到正峰值，在180°时候返回为0°，在270°时达到负峰值，最后在360°时候再次变为0°。在今后的讨论中，将用度（°）来确定正弦波的“点”。

在数学上，一个正弦波周期（T）和频率（f）分别定义为

$$T = \frac{1}{f}$$

$$f = \frac{1}{T}$$

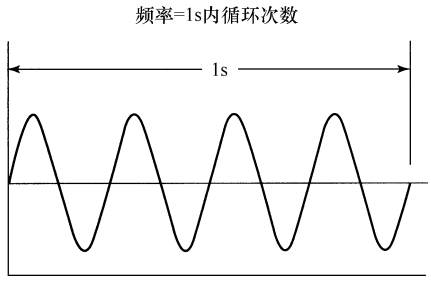


图 6-2　交流电压的频率为
每 1s 内正弦波的循环次数

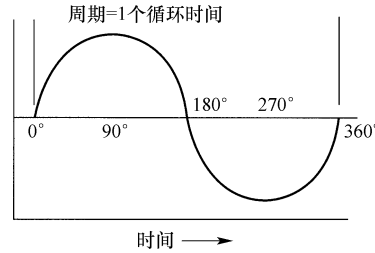


图 6-3　交流电压的周期为
每一个正弦波循环的持续时长

6.4　电磁理论介绍

交流发电机和直流发电机的各种运行原理可以用几个基本的电磁理论来阐述，作为风力发电机和风场的技术人员或维修人员，要完全掌握这些电磁理论，熟悉磁性元件的工作原理。在对发电机进行故障处理或测试之前，要先明白发电机是如何运行的，在出现不同类型故障时能够采用基本原理进行解释。有些电磁概念是建立在交流电压的基础之上，本节主要介绍一些电磁理论的概念，更多关于交流电压以及与之有关的电磁概念将在本章最后部分详细说明。

磁铁是指对铁或钢有吸力的材料集合，大约 4000 年前这种材料首次在一个叫 Magnesia（氧化镁）的城市被以一种岩石的形式发现，后来人们就以这个城市的名字来命名这种岩石。这种材料刚被发现时并没有投入使用，渐渐地，人们发现如果悬挂一串这种岩石，无论怎么打乱排列次序，它们总会自己重新定位，最后相同的末端总是指向同一个方向 – 地球的北极。科学家们很快就从这个现象得出地球本身也是有磁性的这一结论。这种磁性物质最初仅被用在罗盘上，很多年之后，科学家们才开始把两个磁铁相吸或相斥所产生的磁力作为控制设备或电机的一部分。

随着科学家们对磁性材料的了解越来越深入，一些用来研究磁铁的设备也逐步面世，磁铁的研究变得更加有意义，科学家们发现并完善了一系列理论和定律。首先规定每块磁铁有两个极，分别为北（N）极和南（S）极。其次当两块磁铁相同的磁极相互靠近时，它们总是相互排斥，无论是北极或者南极，结果都是一样的；当两块磁铁相异的磁极相互靠近时，它们总是互相吸引。这种“同极相斥，异极相吸”的理论被称为最基本的磁力学定律。

随着尖端实验设备的出现，人们发现这种现象是由基本的原子结构和电子排列引起的。通过对磁铁原子结构的研究，科学家们认为磁铁内原子是按着一定规律分

布的，称为磁畴（domains）或偶极子（dipoles）。在没有磁性或不能被磁化的材料中，偶极子中电子的排列是随机的，通常遵循材料的晶体结构。在磁铁中，每个偶极子都沿着磁力线分布排列。因为每个偶极子与其周边的偶极子的内部排列都精确地相似，磁力逐渐累加变得越来越强。在弱磁材料中磁力比较弱，因为这种材料中偶极子的排列较为随机，而不是沿磁力线分布。由此可得，偶极子的排列越接近磁力线分布，磁场就越强。术语“永久磁铁”是指它内部的偶极子排列能够保持长时间不变，也就意味着它的磁性可以保持很久。图 6-4a 为一无磁性金属的内部偶极子排列图，可以看到它的偶极子排列很随机；图 6-4b 为一块磁性金属的内部偶极子排列图，其中偶极子规律排列方式产生了很强的磁性。

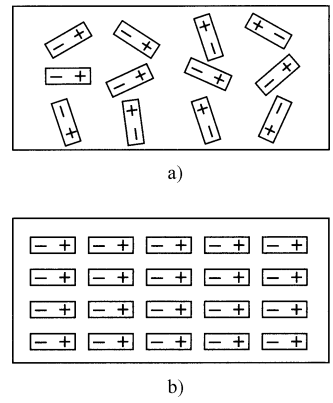


图 6-4 a）弱磁体金属内部的偶极子随机排列 b）强磁体金属内部的偶极子规律排列

6.4.1 条形磁铁和磁力线

图 6-5 是一根由磁化软铁构成的条形磁铁。从外观看呈条形，图中已经标出了它的南、北两个磁极。由于这根条形磁铁的磁性已经保持了很久，所以它是一个永磁体，它所有的偶极子规律排列产生很强的磁场。磁场由一些无形的磁力线组成，磁力线沿着条形磁铁的外部从北极指向南极。图 6-5 中的磁力线是磁力的分布线形，有轻微的弧度，从北极向南极移动。

可以通过一个简单的实验证明这些看起来就像环绕着条形磁铁的磁力线的存在。实验中所需要的设备为：一块透明塑料胶片、类似于投影幻灯片中所用的塑料薄片和一些铁屑。把塑料片平放在条形磁铁上方，并且尽可能地保持塑料片水平，然后将铁屑喷洒在塑料薄片上。这些磁屑在看不见的磁力线吸引作用下，在条形磁铁的外部排列成从磁铁北极延伸到南极的弧线。由于磁力线开始于一极然后延伸到另一极，所以磁力线密度最高的地方在两极附近。铁屑也将集中在这两极附近，但可以明确看到铁屑沿着条形磁铁两侧分为两部分。如果有投影机的配合展示，将磁力线的图像投影到投影仪屏幕或黑板上，就可以更容易地看到这些磁力线，这些铁屑所形成的磁力线就如图 6-5 所示。磁体周围的磁力线数量直接表示了磁体磁力的强弱，强磁体的磁力线会比弱磁体密集得多。一个磁铁的磁场强度可以通过每单位面积内的磁力线数目来衡量。增加磁体内部偶极子的排列规律性，磁力线的数目将增加，磁铁

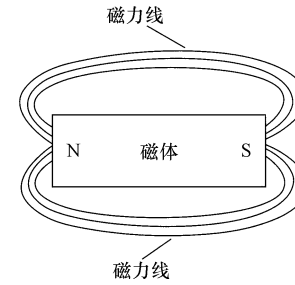


图 6-5 标出南北极的条形磁铁，磁力线从北极指向南极

的磁场强度则随之增强。

铝镍钴磁钢和坡莫合金材料具有比铁磁材料更好的永磁性能，即使反复使用后，其磁畴（偶极子）的排列仍可以保持一致。在一些昂贵的控制设备和电机中会使用这些材料，但通常永磁体都采用软铁材料制成。在电动机和发电机等设备中采用永磁性较好的磁性材料，是因为即使经过多年的长时间使用，这种材料依然会有可用的剩磁。但是永久磁铁有几个缺点：一是永久磁铁磁力是恒定的，很难根据需要改变。这意味着如果有物体被永磁体所吸附，在没有外力强行将其从磁力线引力中强行撤出前，它将永远吸附于永磁体上。二是永久磁铁的磁通为常量，不会随着外界环境的需要而轻易变得更强或更弱。

6.4.2　电磁铁

电磁铁是指内部带有铁心外部缠有线圈，当线圈中通过电流时产生像磁铁一样磁性的装置，电磁铁也称为磁线圈。一个简单的电磁铁就是把导线缠绕在电池上，这个简单电磁铁的属性类似于一个永久磁铁。当把导线连接到电池的两端且有电流流动时，磁场的磁力线就围着导线圈形成同心圆的形式。如果导线附近有铁屑，当电流流经导线时，这些铁屑就会被吸引到导线周围，就像被永久磁铁吸引了一样。图 6-6 显示了导体周围磁场磁力线的分布。图 6-6a 为电流流经导线时周围磁力线的变化，可以用几个简单的实验来证明这些变化规律。实验中在载流导体中插入一个纸板并在纸板上放置一些铁屑，当电流流经导线时这些铁屑将按着同心圆规律排列，展现出磁力线的分布特性。当电流增加时，表示磁通的磁力线的数目也随之增加；随着电流的持续增大，磁力线也继续增多，直到达到饱和状态。当达到磁饱和点时，即使再增大电流，也不会产生更多的磁力线。

把直导线缠绕成一个线圈时，其产生的磁力线变得更加密集，磁场也变得更加强大。图 6-6b 显示了线圈中流过电流时磁力线的变化。由于线圈中的磁力线密集得多，因此实际中常见到的电磁铁多采用线圈形式。例如变压器、继电器、螺线管和电动机等设备中使用的电磁线圈。

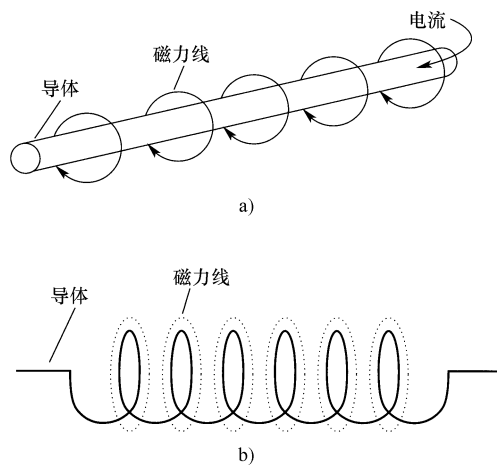


图 6-6　a）直线型导体外部磁力线分布
b）缠绕成线圈的导线外部磁力线分布密集

与永久磁铁相比，电磁铁的优点是其磁场的建立和消失可以通过接通或切断导线中的电流来控制，磁场强度可以通过改变电磁铁导体中的电流来改变。这也许是电磁铁最重要的特性，因为在电机中通过改变磁场强度，可能使电机转轴产生更大的转矩，从而可以拖动更大的负荷，或者使发电

机输出更高的机端电压。当不断增大流经线圈的电流时，磁场也会随之增强，但当磁场达到饱和点时，再增加电流也不会产生额外的磁力线。

如前所述，电磁线圈的磁场可以随着流经线圈的电流通断来改变。在线圈电路中添加一个开关后，通过切换开关的开通状态来改变线圈中电流的流动。当开关打开时电流中断，此时线圈中没有电流流过，也就没有磁场。

发电机、继电器和电磁阀的开关就是利用这一原理，当电流流经线圈时，线圈通电产生磁场；切断线圈中电流时磁场也会随之消失。通过这一原理可以完成发电机的起动和停止运行。当发电机线圈中通过电流时会产生电压，转轴开始旋转。当电流切断时，磁场会减弱，发电机也将停止运行。

6.4.3 通过增加线圈匝数来增加磁场强度

电磁铁的另外一个优点是：它的磁场强度可以通过增加原来线圈（绕组）的匝数而增强。磁场的增强是由于线圈的供电长度变长，那么可提供的磁力线也随着增加。由于磁通变得更加集中，磁场也会变得更紧密地围绕着线圈。因此在一些需要最大限度增加线圈匝数的电磁铁中，常常采用一些非常细的导线。由于导线变细，也使得流经它的电流必须适当减小，这样做是为了保护导线不被烧毁。

一些电动机也采用这种方法来增加其功率和转矩等级。这些电动机装有多个线圈，它们通过不同的连接方式来改变转速和转矩。转矩是衡量电动机转轴输出的指标，通过线圈的串联或并联可以改变电动机转矩和转速。

6.4.4 通过改变铁心材料来增加磁场强度

电磁铁的磁场强度也可以通过改变放置在线圈中心的材料来改变。铁心插入线圈的深度越深，磁场也越强。当把铁心从线圈中完全移走时，可以认为线圈是一个空心电磁铁，这时的磁场是最弱的。如果所使用的铁心是软铁，它在增强磁场的同时也带来一个有过多的剩磁的问题，这是人们不需要的。剩磁意味着当线圈中没有电流流过时，铁心依然类似于一个会保留磁性的永久磁铁。这个问题可以通过用层压钢代替软铁来解决，层压钢型铁心采用多个钢板层压在一起形成一个实心，如图6-7所示。当线圈中流过电流时，层压钢铁心的磁场也随着增强，能够产生与软铁一样的磁场；而当电流中断时，磁场能够迅速消失。因为叠层钢的每一片都不会保持足够的磁场。

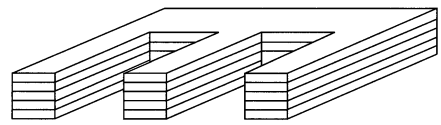


图 6-7 由叠层刚压制成的铁心

6.4.5 电磁铁磁场极性的改变

当线圈中有电流流过时，流经线圈的电流方向决定了导线周围磁场的极性，磁场极性又决定了交流或直流电动机转轴旋转的方向。如果电流流动变成相反方向，磁场极性也将随之颠倒，电动机转轴也反向旋转。在一些应用中，诸如偏航驱动电动机和液压马达，转速能够反向是非常重要的。在这些应用中，可能会通过更改三相电动机的电流或电压绕组连接，使电动机朝着相反方向旋转，也可能需要通过改

变线圈中电流的流向或改变电源电压的极性来改变电动机的旋转方向。

另一个极性改变的情况是在发电机中用于产生电压的在磁场中运动的导体。当导线沿着一个方向通过磁场时，使发电机产生对应方向的电流流动；如果导线沿着相反的方向通过磁场时，发电机中的电流则朝相反方向流动。实际这也是发电机工作的基本原理。

6.5　直流发电机

直流发电机和直流电动机具有相同的结构，当电动机发电时它的转轴或电枢也会旋转。两者的主要区别在于电动机消耗电能产生机械能，而发电机则由转轴吸收能量，如从风力机的叶片吸收动能，继而转化为电能。直流电机既可以工作在电动状态，也可以运行在发电状态，例如如果采用风力机叶片的能量来驱动转轴旋转，而不是在电枢绕组端子供电，前面介绍的直流电动机就可以作为直流发电机使用。当直流电机作为发电机使用时，电枢或转子旋转时就会在电枢端子输出电流。

直流发电机发出的电能可以给蓄电池充电，也可以作为直流电源，通过电力电子变频器（PEFC）或电力电子逆变器转换成 60Hz 交流电输送出去。实际中直流发电机的应用并不是很多，但是需要了解它的运行理论。因为这种理论同样适用于其他种类繁多的电气设备，如交流发电机等。

6.5.1　直流发电机

并励直流发电机的基本组成部分有励磁绕组、电枢绕组和转轴。励磁绕组安装在发电机的固定部分，称为定子；电枢绕组是具有换向元件的转动部分。电刷连接发电机固定部分和转动部分的换向器，与电枢绕组有电连接。发电机端盖内安装有轴承，使电枢轴转动更加轻松。电枢转轴延伸到发电机某一端并伸出，提供一个实现机械耦合空间以便从转轴输入机械能量。图 6-8 表示了一台直流发电机定子的两个部分，定子两部分之间的虚线代表磁场的磁力线。图中的磁场是由定子铁心和励磁绕组产生的，可以通过增大流经定子绕组的电流来增强。

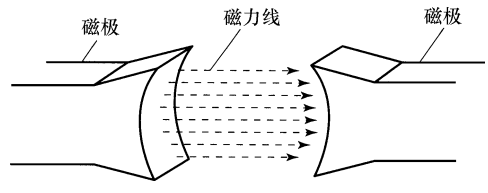


图 6-8　直流发电机的磁极和磁力线分布

在这里需要介绍和阐明一些简单的电工理论。发电机工作时会产生电压，该电压可作为一种潜在电源使用。电路中的电流大小取决于施加的电压以及连接于电压源上电阻（负荷）的大小，此处电阻起到阻碍电流的作用。发电机端产生电压时，若将负荷连接到发电机上就会产生电流。若发电机空载，即不带负荷时，也就没有电流流过。

当导线在一个磁场移过时，会有电流流过。在一台直流发电机中，导线是发电

机转动电枢的一部分。当电枢开始旋转时，绕组中的导线切割磁场而产生电流。磁场越强或电枢旋转越快，发电机就会产生越大的电枢电流。

图 6-9 显示了一根运动并通过磁场的电枢导线。因为电枢旋转轨迹呈圆形，可以用 0° ~360°的方位角度来描述，然后绘制出发电机电枢旋转时的输出电流波形。随着电枢从 0°移动到 90°，正弦波由 0V 增大至正的最大值；随着电枢从 90° ~ 180°，正弦波从正的峰值电压降回零，每个电枢绕组都由换向器中的换向片连接到外部的接线端子。图 6-9 中发电机的电枢绕组的两部分分别通过一个换向片连接，对应地与换向器接触的是两个电刷。这意味着换向器在一个 360°的旋转周期内一直连接着电枢和电刷，这是永久性设施。刚开始这可能很难理解这种连接方式，但仔细观察会发现随着电枢的旋转，线圈会向下切割磁场，产生一个正弦波的正半波。当电枢在接下来的 180°旋转时，换向器也随着旋转 180°，就会产生另外一个正弦波的正半波，并通过正向电刷发出，这就使发电机产生一系列的正半波。因为所有的正弦正半波具有相同的极性，所以发电机输出直流电。

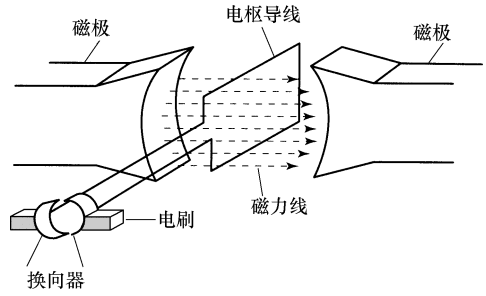


图 6-9　直流发电机电枢绕组切割磁力线示意图

电刷和换向器的两个重要功能是：首先电刷与换向器之间实现了固定部分和旋转部分的电接触；其次是电刷和换向器都有旋转时的交替循环特性，所以电枢产生并输出的始终是直流脉动电压。

6.5.2　他励发电机

图 6-10 为他励发电机结构图，电枢的两侧分别与电刷连接。从图中切面的角度看，不同类型的发电机电枢会显示出不同的特征，连接到电刷的两根电枢端线分别为 A1 和 A2。

在他励发电机中，需要用外部电压（电源电压）提供励磁电流，该电流的流动会产生一个强磁场。只有外部电源可用时，他励发电机才能够起动运行。另一点要指出的是，与他励发电机电枢绕组产生的电压相比，用来产生励磁电流的外部电压要小得多。

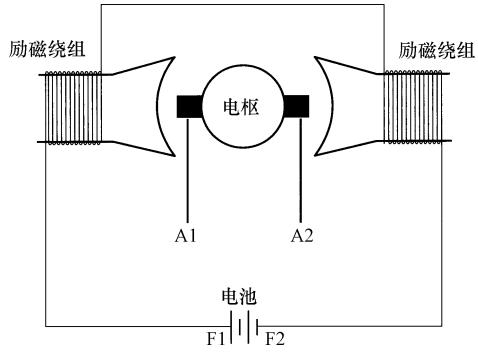


图 6-10　他励发电机电气原理图。他励发电机的电压来源于电池组

6.5.3　自励发电机

图 6-11 为自励发电机结构图，图中励磁绕组的末端 F1 连接到电枢绕组的 A1 上，励磁绕组的末端 F2 连接到电枢

绕组的 A2 上。这种连接可以使一小部分电枢电压被施加到励磁绕组上用来产生磁场。与他励发电机的励磁电压类似，建立这种磁场需要的电压，通常小于发电机电枢输出端电压的 2%。

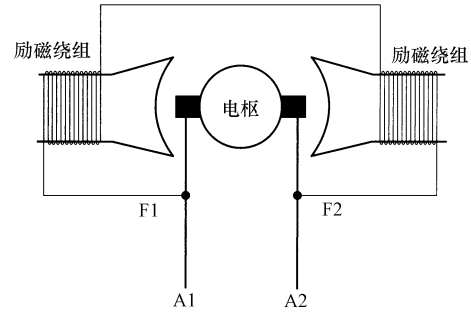


图 6-11　自励发电机。
自励发电机电压来源于发电机的电枢

由于自励发电机需要励磁电流来建立电枢电压，因此剩磁所提供的磁力线必须能激发出发电机起动所需要的电枢电压。随着电枢电压的增加，它会产生更大的励磁电流，从而使得发电机产生更大的电枢电压。励磁绕组的电阻值固定，因此电压上升在励磁绕组中将表现为电流增加。励磁电流的增加又会引起磁场的增强并最终到达饱和点。磁场饱和点是该绕组磁场最强的程度，此时即使电流继续增加，磁场也不会进一步增强。

如果自励发电机很长时间没有工作，那么它可能会失去剩磁。一旦发生这种情况，必须采用一个外部电压源，如电池或从电网整流得到的电压来提供励磁电压，开始重新建立磁场。这种采用外部电压源建立励磁电流的方式称为磁场再建，此时需要观察外部电压极性和磁场极性，防止改变了发电机磁场极性从而引起发电机机端电压极性反向。如果发电机机端电压极性反向，则需要重新建立一个与上述电压极性相反的电压，以便产生正确的磁场极性。重要的一点是要注意励磁绕组相对于电枢绕组的极性，确保励磁绕组终端与连接的电枢绕组终端的极性一致。这意味着，F1 应连接到 A1，F2 应连接到 A2。

在自励直流发电机中，励磁绕组与电枢绕组并联。这种连接类型的发电机称为并励发电机，意思是励磁绕组与电枢绕组并联。这也意味着如果这种类型的发电机以恒定转速运行时，电枢电压将长期保持不变。由于励磁绕组与电枢绕组并联，励磁电压也将长期保持不变，只要限制负荷变化这种平衡将保持下去。如果负荷电阻下降，例如当住宅楼中打开更多的电灯，电枢电流将增加，导致发电机发出更多的电力。当这种情况发生在并励发电机回路中时，输出的电压会略有下降。也就是说，当负荷比较小时，并励发电机会产生更大的电压；当其电力负荷高时，产生一个较小的电压。如果用并励发电机发出的电能对电池进行充电，这种较小的电压变化是不会有影响的。

6.5.4　复励发电机

图 6-12 为复励发电机，从图中可以看到，这种发电机同时有串联励磁绕组和并联励磁绕组。串联励磁绕组由非常大的线圈组成，它和电枢以串联方式连接，所有与电枢相连负荷的电流也流过该线圈，因而建立的磁场更强大。这种类型发电机的主要特点是能产生一个与负荷无关且相对恒定的电压。

图 6-12 中给出了一些复励发电机的连接方式：当复励励磁绕组（F1-F2）仅

和电枢并联时称为短复励，如图 6-12a 所示；当电枢和串联绕组（S1-S2）先串联再与励磁绕组并联时称为长复励，如图 6-12b 所示；如果串联励磁绕组和电枢绕组极性相反时称为差动发电机，如图 6-12c 所示。短复励是目前较流行的连接方式，因为它可以在不同负荷下提供恒定的电压。差动发电机在负荷较小时可以提供相对恒定的电压，但随着负荷的增大，其电压显著降低。

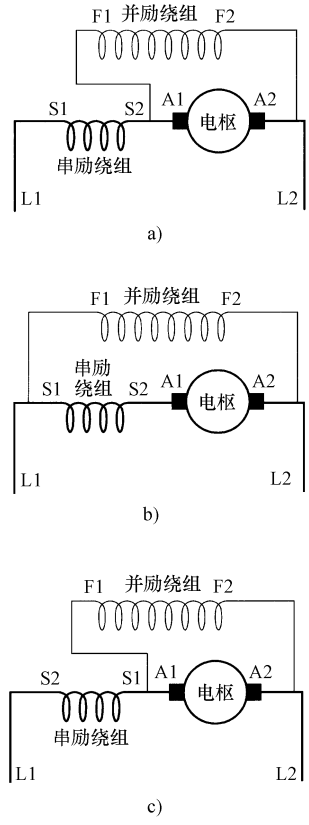


图 6-12　复励发电机接线

a）短复励发电机

b）长复励发电机

c）差动复励发电机

6.5.5　串励发电机

如果直流发电机中只有串联励磁绕组与电枢相连，而并励绕组不使用时，则称为串励发电机。串励发电机一般很少用到，但是要掌握其基本运行原理。在串励发电机中，励磁绕组、电枢绕组和电气负荷都是串联的。这意味着当负荷电阻减小时，发电机电流增大，发电机就需要发出更多的电。当负荷电阻增大时，电流减小，发电机负荷也相对较低。这也意味着当流过发电机的电流较小时其电压也是较低的，电流增大时电压也随着增加。这就产生一个可变电压，幅值范围为接近 0V 到发电机允许输出的最大值，串励发电机在多数应用中并不是十分有用的。

6.5.6　直流发电机电压和极性的控制

直流发电机的输出电压控制可通过以下两种方式中的任一种：第一种方法是通过控制转速来控制电压，使转速保持在一个恒定的速率，通常是通过控制柴油或汽油发动机转速来控制发电机的输出电压。如果直流发电机是由交流电动机驱动的，它的转速也将趋于恒定。第二种方法是通过调节励磁电流来调节电压，这可以通过一个稳压器控制电路自动实现。当速度不变时，采用电压调节器可以精确控制直流发电机的输出电压。稳压器使用固态器件实现，如绝缘栅双极晶体管（IGBT）或运算放大器等，所以即使负荷变化，电压也可以实现自动控制。如果稳压器是一个老式的，可能需要通过手动调节应用程序中励磁电压设定水平来改变。

直流发电机的极性也可以采用两种控制方式来实现。可以通过改变旋转方向使电枢电压的极性相反。如果发电机是由柴油或汽油引擎驱动，这种方法可能不太适用。如果发电机是由三相交流电机驱动，那么就可以很容易通过交换三相输入电压中的任何两个来反转发电机。

如果旋转方向不能改变，还可以通过改变电枢绕组和励磁绕组的极性来改变发电机的极性。在一些情况下为得到想要的极性可能需要外部电压来改变极性。

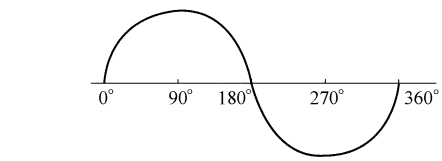
6.6　交流电动机

为了更好地学习交流发电机，首先要理解交流感应电动机的运行理论，认识其基本构成。因为部分交流发电机在实际中是作为电动机运行的，如果不掌握交流电动机的工作机理，就很难理解交流感应发电机的运行原理。

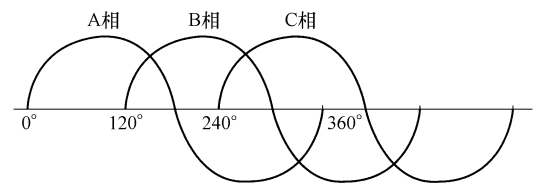
6.6.1　三相交流电的特点

为了学习三相交流异步电动机的基本运行原理，首先需要了解交流电的特点。交流感应电机是为了利用三相电压的特征优势进行特殊设计的。图 6-13a 是单相电压波形，图 6-13b 是三相电压波形。在三相电压波形中，可以看到三相电压的每一相波形都分别类似于单相电机产生的单相电压，三相电压之间互差 120°。电压周期的计量用电角度描述，正弦波周期为 360°。发电机的转轴每旋转 360°就会产生一个 360°的电压正弦波，360°的电角度就相当于 360°的机械角度。本节所有讨论内容的前提是基于 360°电角度等价于 360°机械角度。

图 6-13b 中，第一个电压波形为 A 相，开始于 0°，在 90°达到正峰值，然后逐渐减小，在 180°时再次变为 0V；之后持续减小变负，在 270°达到负峰值，然后又逐渐增大并在 360°重新返回为 0V，同时这点也是下一周期的开始角度 0°。图 6-13b 中，第二个电压波形为 B 相，它的零电压点滞后于 A 相 120°，B 相到达正峰值和负峰值的规律与 A 相类似，但相位延迟 120°。这意味着当 A 相在 180°通过其零电压点时，B 相正在正方向且向正峰值变化。图 6-13b 中，第三个电压为 C 相波形，它的零电压点滞后 A 相 240°。也就是 B 相滞后于 A 相 120°，C 相滞后于 B 相 120°。



a)



b)

图 6-13　a）360°的单相正弦波
b）三相正弦波；各相互差 120°

交流电动机的这一特殊优势可以用来为定子和转子提供一个非常强大的旋转磁场，由于磁场是由外加电压感应产生的，三个电压产生的磁场也是三个相差 120°的磁场。感应磁场与产生磁场的励磁电压相位相差 90°㊀，而这 90°㊀的相位差比起磁场间 120°的相位差显得不那么重要，因为旋转磁场间 120°的相位差有助于产生电动机转轴的转矩。

㊀ 原文为“180°”，应该为“90°”。——译者注

由于旋转磁场间120°的相差，使得当一个磁场正在逐渐增强时，另一个正穿过正弦波的零点逐渐减小。这意味着由三相电压产生的磁场不会完全达到饱和状态，因此产生的平均场强比单相电压要强。三相电压和变压器的详细讨论将在本章最后详细讲述。

6.6.2 三相电动机的构成

交流电动机可用在单相或三相电源系统中，大多数单相电动机小于3hp，不过实际中也有一些功率稍大但不常见。三相电机可高达几千马力，但是50hp以下的电动机是较常见的。

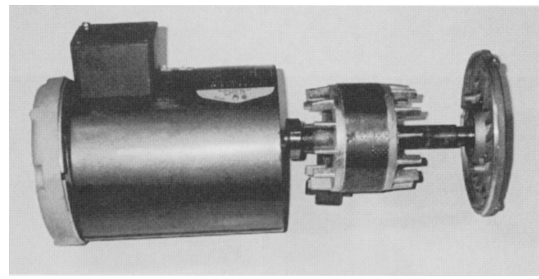


图6-14 三相交流感应电动机结构。注意笼型转子的转轴安放到位于端盖内的轴承中

交流感应电动机由三部分组成：定子，这是电动机的固定部分；转子，这是电动机的旋转部分；还有安装使转子自由转动的轴承的端盖和底座。本节将讲述交流电动机三个基本部分的具体内容。图6-14为三相电动机的结构图，图中表明了电动机基本组成部分的安装位置，以及它们之间的配合关系。

6.6.3 定子

定子是电动机的固定部分，由几部分组成。图6-15为一个典型的异步电动机的定子示意图。定子是通过齿槽安放静止线圈的带有安装孔的框架部分。电动机的安装孔尺寸是按照国家电气制造商协会（NEMA）为电动机制定的标准选取的。有些电动机的定子上有一个吊环，这为安装较大电动机提供了一种方法，吊环和安装孔实际上内置在定子框架上或属于定子外壳的一部分。

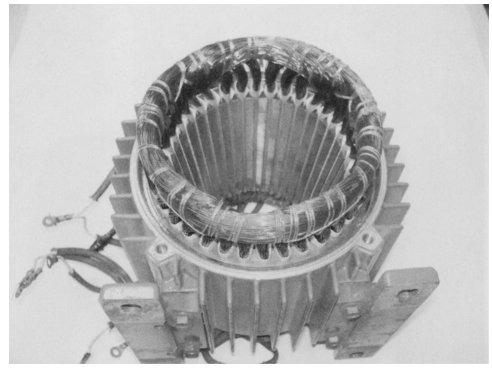


图6-15 交流电动机的定子

定子上提供了安放定子绕组的齿槽，齿槽是由层压钢做成的，层压钢可以防止涡流和磁滞损耗。定子绕组是按照预制形状和预定长度缠绕在齿槽内的线圈，这些绕组由绝缘层包裹，然后放置在定子槽内并与之绝缘。一个典型的四极三相电动机由三个线圈连续安装在齿槽内形成一组，这三个线圈都分别承受来自三相电源不同相的电能，三组连接在一起形成了电动机的四极之一。电动机其他三极重复这种结构，最终需要36个线圈形成一个完整的四极定子绕组。一般情况下不需要

掌握如何封装线圈或把线圈嵌入定子槽内，相反应该明白这些定子绕组全都是相连的，3、6、9、12 或 15 股线圈分别引出外部接线，通过这些端部连线可以使电动机发出 208V、230V 或 480V 的电能，或者使电动机产生相应的负荷转矩。也可以对这些连接做一些改变，使相对较小的转子电流就可以起动电动机，这就意味着不需要太大的电流就可以起动电动机。

当线圈放置在定子内后，可通过末端数字来识别线圈数，这些数字用在设备安装连接中。线圈通过楔子固定在定子中，既可以保证线圈安全地固定在齿槽内，也可以保证线圈更换和移除的简易性。这样当线圈损坏或线圈过热引起定子损坏时可以很容易地进行维修。

6.6.4　绕线转子

交流电动机中的转子可以由层压钢缠绕线圈构成，也可由没有任何线圈的复合钢板组成。缠绕线圈的转子称为绕线转子，用在绕线转子电动机中。绕线转子电动机相比采用笼型转子的感应电动机㊀可以产生更大的转矩，它通过电刷和集电环来给转子传输电流。由于绕线转子电动机有电刷和集电环，因此它比感应电动机要多考虑一个部件的维护。图 6-16 为绕线转子电动机电枢上的两个集电环。

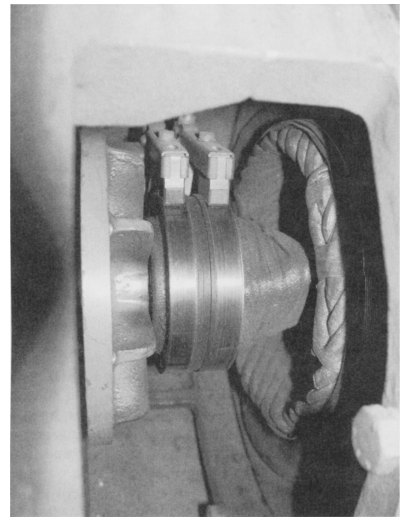


图 6-16　有两个集电环的绕线转子电动机电枢

6.6.5　叠层钢转子

交流感应电动机采用叠层钢转子时，称为感应电动机或笼型异步电动机，转子是由压铸铝或铜做成一个笼子的形状。笼型转子如图 6-17所示，从图中就可以明白这种转子为什么被称为“笼式”了。图中铝条或铜条的末端都固定在一个圆环上。笼型转子有时被称为鼠笼式转子，因为整体造型同训练仓鼠和松鼠的旋转型笼子类似。

在制作笼型转子时，叠层钢片被压接到转子上，或者说转子的核心部分做成层压型。图 6-18 为笼型转子，图中可以看到叠层钢被压到笼子的核心骨架部分。这是一个具有保温涂层的复合钢薄片，防止钢件与它旁边的电气部分相连接。钢件薄片上压着转子铜条，而不是单独的一块铁片。因为钢的各个部分极容易磁化产生极性，也很容易消磁

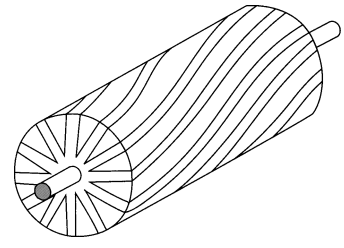


图 6-17　笼型转子

㊀ 本文中“感应电动机”特指“笼型转子异步电动机”。——译者注

和再次磁化，然后产生相反的极性，这种不断变化的特性对于转子交流电流建立磁场是非常重要的。如果转子是由实心铁或钢制成，它比较容易磁化但不太容易去磁，当交流电流通入转子时，这就会是一个比较严重的问题。

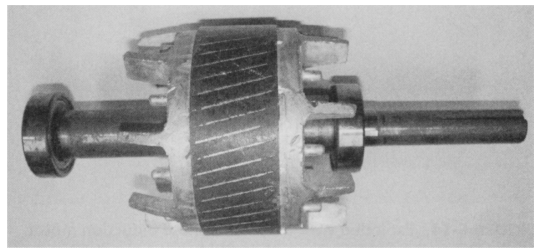


图 6-18 感应电动机中的笼型转子

转子端部一般装有用来冷却电机的散热片或叶片。值得提出的是，这些风扇叶片是没有损耗的，因为它们提供了电动机冷却的空气介质，同时还为转子旋转提供了平衡，使其旋转均匀无振动。

6.6.6 电动机端盖

电动机转轴的轴承位于端盖内，如果电动机为小功率型一般用套筒式轴承，如果电动机是较大功率类型将采用球轴承。一些规模较小的电动机球轴承是永久性润滑的，而在较大的电动机中，轴承则需要定期润滑。所有的套筒轴承都需要定期滴入少量润滑油。

端盖安装在电动机的两端，通过长螺栓插入定子外壳进行固定。端盖就位后拧紧螺栓确保端盖的位置安全。如果电动机是开放型，端盖就会设置天窗，让空气流通使电动机冷却。如果未在规定的定子外壳安装接线盒，也可以通过端盖提供现场接线。

如果电动机没有永久润滑，端盖有一个油壶管或油嘴用来加入润滑油。值得注意的是，在端盖安装时要使油壶管或油嘴在转轴上方。如果端盖旋转移位使润滑点低于转轴，由于重力原因将使所有的润滑油远离转轴，会使轴承过早磨损。如果需要移除端盖，应该进行标记，以便能找出它的确切位置。这也有助于端盖与定子外壳的孔重新对齐组合。

6.6.7 绕线转子交流电动机的运行

绕线转子电动机中除了有一套安装在电动机的固定部分——定子上的绕组以外，其转子也是由缠绕在转子铁心上的绕组构成的，这些绕组的终端连接到与电刷接触的集电环上。电刷和集电环用来传输电动机发出的电能，电刷连接电动机的定子，可将电能输送到与集电环相连接的转子上。如果绕线转子电动机为单相式，则需要两个集电环，如果三相，则需要三个集电环。

由于电流是直接通过电刷和集电环提供给转子的，因此转子可以建立很强的磁场。当电源与电动机相连时，流经定子绕组的电流就会建立起一个强大的磁场，而电流通过电刷流向集电环进入转子后也形成一个磁场。因为定子绕组通入交流电，所以会形成旋转磁场。转子绕组与定子绕组的磁性相反，所以转子磁场与定子绕组的旋转磁场相互吸引。这使得转子开始旋转或者说转子磁场追逐着定子磁场旋转。

转子的旋转速度则是由交流电频率和极数决定的。表 6-1 中列出了定子通入 60Hz 交流电，极数由 2 变到 12 时的转子转速变化情况。

表 6-1　电动机在 60Hz 下的转速

极数	2	4	6	8	10	12
转速/(r/min)	3600	1800	1200	900	720	600

绕线转子电动机的一个主要缺点是在电接触和电弧作用下电刷会磨损，集电环会变得粗糙。这意味着电刷要定期更换，集电环要定期重新铺设。

6.6.8　交流感应电动机的运行

感应电动机的工作原理是基于这样一个理论，转子电流是感应产生而不是像绕线转子电动机那样通过电刷和集电环引入。感应电动机中转子由层压钢构成，转子旋转时靠近定子，所以很容易被磁化。当定子绕组通过电流时会建立一个强大的磁场，当转子通过这个磁场时，层压钢中感应生成的电流导致层压钢被磁化。就像在绕线转子电动机中，叠层钢转子磁场和定子磁场极性相反。由于定子磁场是由交流电感应建立的，它会切割定子绕组旋转。由层压钢转子电流感应产生的磁场将会滞后于它 180°，这就使得转子的磁场与定子旋转磁场极性相反。由于定子和转子磁场极性相反，从而使转子磁场受到定子磁场吸引，从而驱动转子开始旋转。

由于感应电动机的转子磁场是通过感应电流产生的，就会存在绕线转子电动机中所没有的一些额外损失，因此感应电动机效率略小于绕线转子电动机。但是由于感应电动机不需要电刷或集电环，所以它不需要考虑太多的维护。

6.6.9　感应电动机中转矩的形成

当转子在感应电动机转矩驱动下开始旋转时，它就感应出一个与定子外加电压相位相反的电压，这个电压称为电动势（EMF），因为它与外加电压方向相反，被称为反电动势（CEMF）。外加电压和反电动势之间的压差决定了电动机中电流的大小，电流反过来又决定了作用于电动机转轴的转矩大小。反电动势的大小又取决于转差，转差是同步转速和电动机实际转速的差异。转差越大，电动机转矩越大，能够带动的负荷就越大。

从理论上讲，类似同步电动机那样，感应电动机应以由极数和所加电压频率决定的同步速度旋转。但在实际应用中，如果电动机转子运行在其同步转速时，转子将产生一个等于外加电压的反电动势，那么电动机的电流值将下降为零。如果电动机电流降为零，电动机转轴就不会产生任何转矩，也就无法带动负荷。为了使电动机转轴具有较大的转矩，外加电压和由转子产生的反电动势之间必须有一个差值，这种差值一般只会出现在转子的转速比其同步转速慢的情况下，这种速度差即为转差。转差越大，交流感应电动机产生的转矩越大。

6.6.10　同步电动机

另一种类型的电动机称为交流同步电动机，它结合了绕线转子交流电动机和感

应式交流电动机的优势。同步电动机有一个绕线转子，这意味着它具有同绕线转子电动机一样的电刷和集电环。它也有一个嵌在绕线转子上的小型笼型绕组，当给同步电动机首次施加交流电压时，因为其笼型绕组会感应出电流使得转子起动和加速，同步电动机以笼型电动机方式起动。当转子的转速达到额定值的95%以上时，绕线转子的绕组流经一个直流电流，这个直流电流流过电刷和集电环，在转子绕组中建立一个非常强大的磁场。转子磁场与由定子绕组建立的旋转磁场同步旋转，这种同步使转子运行在额定转速，从而为同步电动机转轴提供了最大转矩，而且效率更高。同绕线转子电动机相似，同步电动机也有电刷和集电环，就需要一些定期维护和保养。

6.7 交流发电机

发电机是指把机械能转换成电能的设备，它能够发出交流电或直流电。交流发电机在转子切割磁场的情况下发出交流电能。

在研究风力机时，会遇到的几种不同的交流发电机。交流发电机可以采用带有电刷和集电环的绕线转子，也可以采用层压钢笼型转子。根据不同的设计方式，交流发电机可以由转子绕组输出大电流，也可以由定子绕组输出大电流。如果转子中输出大的电流，则需要集电环和电刷把转子发出的大电流输送到发电机定子上，这时产生大电流的部分是电枢，这种发电机被称为旋转电枢式发电机。如果大电流是在定子产生的，叫作静止电枢式发电机。因此电机的固定部分总是被称为定子，而转动部分总是被称为转子。图6-19为一个安装在风力发电机组齿轮箱转轴上的发电机，在发电机前方可以看到电气接线盒。

6.7.1 发电机发出交流电的电磁原理

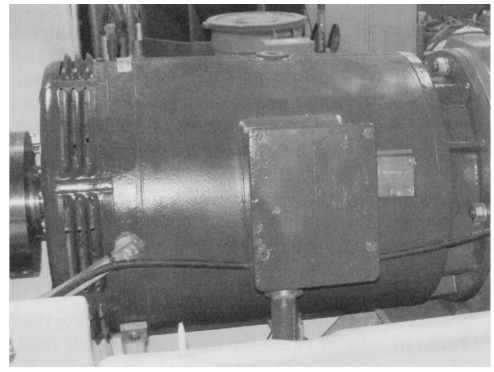


图6-19 风力发电机示意图

在本章前面几节已经介绍了一些电磁理论，根据这些理论能够解释在交流发电机中如何基于电磁作用建立电压。本节讲述发电机如何发出交流电。AC为“交流（Alternating Current）”的简称，这个词是从描述半个周期为正、半个周期为负的交替电压而来的。图6-1中描述了交流正弦波的特点，无论是电压和电流都有正弦波特性。发电机产生机端电压，当与电网或负荷相连构成回路时便有电流产生。电压和电流的组合形成电功率，发电机功率的计算方法是电压乘以电流。

交流发电机产生在正负之间交替变换的交流正弦波。发电机这一术语是指电机

通过转轴旋转切割磁场发电，而交流发电机则意味着发出的是交流电。

简单的交流发电机有两个基本部分：转子，主要指一套安装到转轴上的旋转绕组；定子，主要指一套流经电流时会产生磁场的静止绕组。外加电压连接到定子绕组两端且有电流流过时，定子就能够建立起强大的电磁场。

转子绕组安装在交流发电机的转轴上，转轴由如风力机叶片等一些动力源驱动。当旋转绕组通过由定子电流建立的磁场时，绕组中就会感应出电流。随着转轴的旋转，转子绕组首先经过正向磁场，然后再经过负向磁场，最终完成 360°的旋转，在此过程中产生完整的 360°正弦电压波形。在美国，发电机的转速保持在一个恒定的速率，以使得发电机每秒产生 60 个完整的正弦波，即输出交流电的频率为 60Hz。

由于转轴不断转动，一般用导电的电刷实现交流发电机固定部分和转子集电环之间的电接触。电刷采用一种弹簧机制，确保有足够的弹簧张力使电刷与发电机的转子紧密接触。这样就可以把发电机转子的电能转移到定子。电刷与发电机外部静止的结构框架是绝缘的，并且电刷可以与负荷相连。还有一点比较重要，外加的励磁电压可以调整，以改变交流发电机输出电压的大小。

将励磁电压施加到发电机是为了得到电枢电压输出，励磁电压数值太小而不能作为发电机的输出电压。交流发电机是一个非常好的能量转换器，仅需要一个较小的电压就可以产生出足够大的电流来建立所需要的磁场，最终交流发电机发出的电压可能达几百伏。例如风力发电机叶片捕获大量风能后带动交流发电机转轴旋转，发电机就可以发出数百倍于励磁电压的电压。交流发电机发出的实际功率接近于风轮传输给转轴的机械功率。

6.7.2　静止电枢式交流发电机的运行原理

静止电枢式交流发电机的应用非常广泛，因为大量电流是通过静止的定子绕组产生的。这意味着因为定子不旋转，用于将发电机电流输出的外部电气电路可以直接与定子绕组末端进行固性连接。在静止电枢式发电机中，这种连接是固态的，在旋转电枢式发电机中则是通过集电环和电刷实现的。

静止电枢式发电机需要一个小的起动电流作为励磁电流，励磁电流流经转子绕组产生感应磁场。励磁电流的建立需要一个小的外加电压，可以从电网整流得到或采用外部电池提供。励磁电流通过电刷和集电环流至转子旋转绕组末端，最终流入转子绕组。转子建立磁场所需的电流量非常小，所以其对电刷的磨损和对集电环的蛀蚀不像大电流那么严重。

一旦励磁电流流经转子，转子就变成一个非常强的电磁铁，产生强劲的磁力线。当转子磁场通过定子绕组时后者切割磁力线，发电机就会发出交流电。通过增加或减少励磁电流的大小可以增加或减少发电机输出电压的大小。在风力机中，风力机叶片转速较低，因此一般采用齿轮箱提高与之相连的转轴速度，以带动发电机以通常高于 1800r/min 的转速高速旋转。在大多数风力机中，通过叶片节距或偏航

调整使风力机的转速保持在一个相对稳定的范围内。由于转速是恒定的，通过调节励磁电流以保持电压输出在690V。

当交流发电机的励磁电压来自外部电源时，称为他励发电机。当励磁电压采用发电机本身定子电压时，称为自励发电机。自励发电机需要有一个永磁铁，或通过其他方式使转子能够建立初始磁场，从而带动发电机开始发电。一旦定子开始发电，就可以使用自己的电压建立磁场。

在靠感应产生励磁电流的交流发电机中，转子需要保留少量的剩磁以便为定子建立电压提供必要的磁通。一旦定子电压建后，转子在旋转切割定子绕组建立的磁场时就会感应出数值较小的电压。转子可以感应出交流电是因为转子和定子之间的间隙非常小，而且当定子在建立定子电压时产生的磁场是非常强的。每当导线（线圈）切割磁场时，就会感应出电压，转子上有一个个线圈依次缠绕而成的绕组，它通过磁场时也会建立起一个交流电压。

在静止电枢式交流发电机中，磁场是在转子绕组中建立的，建立磁场所需的直流或交流电流由外部电源供给电刷和集电环。小型单相发电机只需要两个集电环，因为转子的一个线圈只有两端，每端分别连接一个集电环。大型三相交流发电机需要三个独立的集电环来分别为三个转子绕组提供励磁电压和励磁电流。随着励磁电流的增加，转子建立的磁场也逐渐增大直到饱和。当交流发电机转速逐渐增加或励磁电流增大时，发电机输出电压也会增加。在风力发电机中，当风速变化时可以通过一个励磁调节器、一台计算机或可编程序控制器（PLC）来调节励磁电流，保持输出电压恒定。

综上所述，当励磁电流流经转子绕组就会产生磁场。风力发电机转子由外部动力源（风力机叶片）驱动，它旋转时就会产生一个旋转磁场。当旋转磁场切割静止的定子绕组时，定子绕组会感应产生一个很大的电压，当定子并网时就会输出电流。发电机的电压可以通过改变转子励磁电流进而改变旋转磁场，或者改变转子的转速来调节。交流发电机发出具有一定频率的交流电就是转子旋转的结果，这意味着转子转速必须保持稳定以保证输出频率恒定在60Hz。为了调节发电机的输出电压，必须调节励磁绕组两端的电压以改变励磁电流。本章的后面部分将讲述如何用其他方式来控制发电机的频率。此处进一步阐释发电机的发电原理。

6.7.3 定子交流电压的产生

转子旋转磁场通过定子绕组时，磁场的极性决定了定子电压的极性。图6-20为旋转磁场通过定子绕组以及由此产生的交流电压波形。图6-20a中，当正极性磁场的磁力线通过定子绕组时，产生一个正的电压。开始只有少数磁力线通过线圈，所以感应电压很小。当转子继续移动，磁场越来越强，更多的磁力线继续切割定子绕组产生电压，直到最大数量的磁力线穿过线圈时，产生最大的电压。当转子开始从90°转至180°时，穿过定子绕组的磁力线逐渐减少，使感应电压再次减少到零。这就是交流正弦波正半波的产生过程。

当转子从 180° 转动到 270° 时，旋转磁场的磁力线从另一端开始切割定子绕组，这些磁力线是从北极发出，在定子上产生负电压。这个电压从零开始并持续增大，直到转子到达 270° 时最大数量的磁力线切割定子，此时达到电压的负峰值。此后转子继续旋转，从 270° 到 360° 时，电压不断减小并再次达到零。从图 6-20b 中可以看到，此时电压波形是正弦波的负半波。这意味着，当转子完成一个完整的 360° 旋转时，发电机产生的波形是包括一个正峰值和一个负峰值的完整周期正弦波。如果发电机发出的电压是 60Hz，那么发电机的周期是 0.016s。如果发电机 1s 内发出 60 个完整的正弦波，转速就是 3600r/min（60Hz/s × 60s/min）。对于交流发电机而言，频率是很重要的，控制频率的一个办法是控制发电机转速。在大型的风力机发电机中有多个线圈，转轴的速度通常调节约为 1800r/min，用来保证发出 60Hz 的交流电。

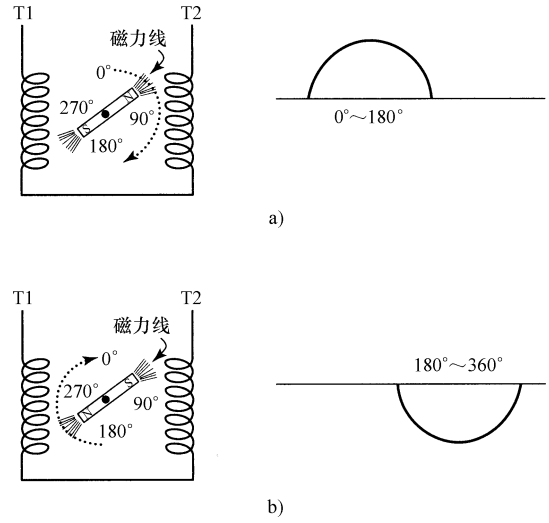


图 6-20　a）正弦波正半波生成原理，由转子磁力线的北极从右边向下切割定子绕组生成
b）正弦波负半波生成原理，由转子磁力线的北极从左边向上切割定子绕组生成

6.7.4　三相交流电的产生

交流发电机发出交流电压可以生成流过负荷的电流，发电机输出功率可以通过电压和电流乘积计算得到。一种能在最小物理尺寸情况下尽量提高发电机功率的设计方法是安装三个独立的定子绕组，每个定子绕组都能独自发出正弦波，这种发电机称为三相交流发电机。三个定子绕组均匀放置在发电机中，发出的交流电各差 120°，这种电压称为三相电压，如图 6-21 所示。每个绕组由多个线圈组成，目的是提高功率等级。

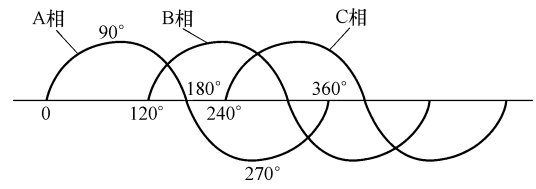


图 6-21　三相电压波形图

6.7.5　旋转电枢式发电机的运行原理

交流发电机的第二种类型是旋转电枢式发电机，这种发电机更像一个直流发电机。它采用定子绕组来创建磁场，当风力机叶片转动并带动发电机旋转时，转子绕组切割定子磁场产生电压。此时转子电压很大，电刷和集电环必须能够承担较大的电压和电流。

在旋转电枢式交流发电机中，电流流经定子时产生磁场，转子绕组切割磁力线

产生电流。流过定子绕组的电流是励磁电流，它通过在定子绕组两端施加励磁电压产生。施加在定子绕组上的电压越大，励磁电流就越大，从而能产生更多的磁力线。当转子绕组旋转时，磁力线越多，转速越快，转子发出的电压越高。在某种程度上，转子的转速可能需要加以控制，以确保交流发电机输出频率为60Hz。

旋转电枢式交流发电机发出的电压和电流的最大值受限于集电环和电刷。由于发电机发出的电流必须通过集电环和电刷，因此其尺寸限制了电压和电流的大小。必须定期检查电刷和集电环，一旦有损坏就要及时更换。正是由于这个原因，旋转电枢式发电机没有静止电枢式发电机应用广泛。

6.8 异步交流发电机

三相异步交流发电机是旋转磁场式发电机的典型例子，它有一个层压钢制作的笼型转子。这种交流发电机也称为感应发电机，输出交流电。异步交流发电机实际上是一种感应电动机，只不过其转轴由风力机驱动将机械能转化为电能，发出大量的电能。对于大型的风力发电机组，异步交流发电机发出690V三相交流电压，然后通过升压变压器升至12470V并网。

异步交流发电机是一种带有层压钢制作的笼型转子的感应发电机，其定子绕组的大型线圈安装在发电机的静止部分，线圈终端连接到发电机接线盒。因为这些连接是通过发电机的静止部分进行的，在这种情况下电气连接可永久保持而不会有没有任何磨损。由于没有集电环或电刷，转子通过相对于定子运动时产生的感应电压来建立转子电流和转子磁场。集电环为安装到电动机旋转部件上的导电金属片，通过与电刷的接触建立发电机旋转部分和静止部分之间的电气连接。异步交流发电机必须直接连接到电网或其他电源上，保证定子中有电流流过，这样转子转动时才能感应出电压。风力机的叶片带动齿轮箱低速轴转动，齿轮箱高速轴带动发电机高速转动，60Hz的发电机转速一般高于1800r/min，50Hz的发电机转速一般高于1500r/min。随着风力机叶片的转动，发电机转子也跟着旋转，切割定子在加电后产生的磁场。转子一旦感应出电压，就会建立起自己的磁场，受到转子磁场切割的定子绕组就会产生较高的电压输出。当风力机从切入风速（通常高于6mile/h）开始起动后，发电机就开始工作并发出690V电能。通过PLC或专用控制器调整励磁电流，就可确保发电机发出的电压尽量接近690V。

6.8.1 异步发电机中的转差

异步发电机在风力机中得到应用的主要原因是，当其连接到60Hz电网时在整个负荷范围内均能以相对恒定的转速运行。当风力机叶片负荷较小时，转速约为1800r/min；当风速增加叶片负荷较大时，转速约为1820r/min，实际转速和同步转速之间的差距为转差。随着风力机叶片捕获风能的不同，齿轮箱和发电机的设计保证了发电机转速在一个较小的范围内波动。由于转速只能限制在一个窄带内，叶

片、转轴、齿轮箱和发电机承受的应力相对稳定，限制了系统的长时间磨损。这种转速基本恒定的运行特性的另一个优点是发电机频率能够基本保证为 60Hz。

6.8.2　发电机的输出频率控制

如果发电机的输出端直接连接到电网，或者作为一个家庭或小型企业使用的交流电压源时，保证其电压频率是非常重要的，可以通过几种方法实现。如果发电机的输出功率较小，如作为小型企业或家庭交流电源，可以通过电力电子变频器（PEFC）的控制来实现，它也称为逆变器。逆变器是一种电力电子变换器，首先使用二极管将交流电转换为直流电，然后使用绝缘栅双极晶体管（IGBT）或其他电力电子器件把直流电转换为单相或三相的标准正弦交流电。在第 8 章中将会讲述更多关于电力电子变频器的内容，以及发电机并网等知识。在这种所有电能都经过变频器转换的方案中，发电机产生的电压频率不是问题，因为任何频率的交流电先被整流成直流电，然后再被逆变为 60Hz 交流电。对于这种类型的系统，逆变器容量必须足够大才以实现对发电机所有输出电能的转换。

另一种确保发电机频率为 60Hz 的方法是控制其转速，使它尽可能地接近 1800r/min。如果速度略有差异，频率就会有不同。但是当发电机连接到电网时，大电网电压将发电机的频率强制为 60Hz。此时可以通过调整风力发电机组叶片的旋转速度来确保发电机转速尽可能接近 1800r/min。在接下来的章节中将以同步发电机、双馈感应发电机等为例介绍其他的频率控制方式。

6.9　同步发电机

同步发电机是旋转磁场型发电机的另一个例子，此类型的发电机转子通常是一个由具有集电环连接的线圈构成的绕线转子。电刷与集电环互相连接，在转子转动时给线圈提供励磁通路，其原理与同步电动机相同。一般地，应用于风力发电中的同步发电机直接并到电网上。直接连接到电网的原因之一是当它起动时可以从电网得到起动电压，此时是作为同步电动机使用，电网提供的电压会使电动机运行于接近同步转速下。加到同步发电机定子上的电网电压的一部分通过整流二极管整成直流给转子提供产生励磁电流的直流电压，当直流励磁电流通过转子绕组时会建立一个非常强大的磁场。随着风速的上升，叶片将实现对风能的有效捕获，此时发电机转子达到可以实现发电的转速。在这种运行状态下风速大约都在 6mile/h 以上，叶片会带动发电机转轴加速转动以便进入发电状态。当同步发电机开始作为发电机运行时，定子电压的一小部分仍继续被整流并传送到转子绕组中来产生更强的旋转磁场，使发电机可以继续发电。调整励磁电压会改变励磁电流，从而调整发电机的输出电压，通过控制励磁电压以确保在任何速度下发电机都输出额定电压。

同步发电机的特点之一是把直流电供给它的转子来产生强磁场，同步运行发电没有转差。这意味着如果发电机正确并网发电，它的转轴将一直运行在同步转速，

保证发电机发出的电压频率为 60Hz。

如果同步发电机不是直接连接到电网上则可以允许转子的速度适度变化，这就导致实际工作频率和额定频率 60Hz 有所不同。例如风力机为了捕获最大风能，风速大时，需要叶片旋转速度较快，这时发电机不能直接连接到电网，需要经过逆变器来提供最终的恒定 60Hz 电能。在这种类型的应用中，变频器的容量要足够大，才能把所有的交流电转换成直流电，然后再逆变成 60Hz 的交流电。这种设计的好处是不管风速大小，风力发电机都可以尽可能多地捕获风能。这种风力发电机组的效率比基于叶片和偏航的转速控制模式高。

6.10 双馈感应发电机

另一种应用在风力机中的异步发电机类型是所谓的双馈感应发电机。这种旋转磁场式交流发电机的特点是定、转子均馈有交流电压。出于这个原因，这种类型的发电机有时也被称为双励磁异步发电机。大多数双馈感应发电机有多相绕线转子，其绕组通过集电环和电刷引出电气连接端子。集电环和电刷可以直接将励磁电流供给转子，消除了转子仅靠感应产生电流带来的损耗。双馈感应发电机通常是三相发电机。

当在风力机叶片驱动下的双馈感应发电机转速低于其同步速时，由定子发电，但发出的一部分电能需要反馈给转子。当风力较强叶片驱动发电机在同步转速以上旋转时，无论转子和定子均向电网发电。这意味着双馈发电机比以前讨论的任何一类发电机的效率都高。

通过逆变器可控制转子电压的频率使发电机发出的交流电频率控制在 60Hz，这种控制特性使得双馈感应发电机广泛用于风力发电中。当发电机定子与 60Hz 电网并网时无论发电机转速如何变化，发电机都会保持 60Hz 的交流电能输出。逆变器只需要转换励磁电流，相比发电机功率而言，转子所需要的励磁电流非常小，比之前需要转换所有发电功率的逆变器容量小得多。

双馈感应发电机的优点是在 6 ~ 50mile/h 风速范围内均可以发出恒定的 60Hz 交流电。无论发电机的转速低于还是高于同步转速（1800r/min），双馈感应发电机都可以通过逆变器控制其工作在 60Hz 环境下。这使得风力机叶片能够工作在阵风下，可以吸收多余的能量，从而提高了风力发电机组的效率。如果风力发电机组容量很大（2MW 或更大），控制系统还可以在变速基础上通过独立变节距或机舱偏航调整来捕获最大的风能。

6.11 永磁同步发电机

永磁发电机需要很强的永磁材料来为发电机提供原始旋转磁场，确切地说，这种发电机的转子需要一个非常强大的永磁体以建立强大的稳定磁场。如同感应发电

机，永磁同步发电机定子也由金属线圈安装在发电机静止部分形成。当风力机叶片带动转子旋转时，转子永久磁场旋转并切割定子绕组，定子绕组感应产生电压。定子绕组属于发电机的静止部分，每个定子绕组末端都可以通过接线盒与外部电路连接，以便于输出电能。由于转子是永磁体，而电压又只在定子绕组中产生，所以永磁发电机不需要电刷和集电环或电刷与换向器。

早期的永磁发电机只是仅为电池充电或者通过逆变器输出少量 60Hz 电能的小型发电机。目前很多大型风力机开始使用永磁电机，因为它们的设计简单，维护量小。大多数采用永磁发电机的风力机为直接驱动型（免齿轮箱），因为永磁电机是一种多极低速发电机。永磁风力发电机不能输出 60Hz 的电压，相反它只能输出较低频率的电压，这样的电压可以经过整流后为电池充电，或者通过逆变器和变压器调节后并入 60Hz 电网。图 6-22 为永磁发电机的内部结构。

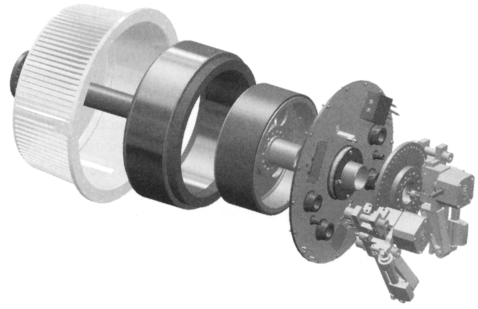


图 6-22　永磁发电机的内部结构
（图片来源：北方电力公司）

6.12　使用交流发电机发出直流电

直流发电机的设计复杂、维护量大，所以现在通常用交流发电机来产生直流电压和电流。在交流发电机的每个绕组上放置两个二极管就可以很容易地使交流发电机发出直流电。二极管是一种电力电子器件，只允许电流朝一个方向流动。如果交流正弦波流经二极管，就会只有上半波或下半波通过。在这种系统中，二极管连接的方式决定了电压的极性，因为它会阻止正弦波的一半，或者正半波或者负半波。一个三相交流发电机通常采用 6 个二极管（三套）实现整流。二极管必须能够承受发电机产生的最大电压和最大电流。如果一套（两个）二极管中的一个二极管损坏，则由本绕组产生的电压只能为额定电压的一半。如果任意一套中的两个二极管均损坏，由该线圈产生的电压将会全部消失。这类发电机的主要故障一般是由二极管损坏引起的。

简　答　题

1. 辨别交流发电机的基本构成。
2. 解释旋转电枢类发电机的工作原理。
3. 阐述交流发电机发出的交流电如何从旋转部分传入静止部分。
4. 提出两种提高交流发电机发电量的方法。

5. 画出一个正弦波，并且标出0°、90°、180°、270°和360°对应点。
6. 列举交流发电机供给转子励磁电压的两种方法。
7. 解释双馈感应发电机是如何工作的。
8. 列出换向器和集电环的不同。
9. 指出绕线转子和笼型转子的不同。
10. 解释为什么一般在笼型转子中采用层压钢。

选 择 题

1. 交流发电机的旋转部分是（　　）。
a. 静止绕组
b. 转子
c. 磁场
d. 集电环
2. 交流发电机用（　　）从它的旋转部分得到电流。
a. 静止绕组
b. 转子
c. 磁场
d. 集电环
3. 三相交流发电机（　　）。
a. 有三个相互独立的定子绕组，各自发出一相正弦交流电压，三相之间互差120°
b. 有三个同时旋转的转子，发出互差120°的正弦交流电
c. 有三个独立的转轴供风力机的齿轮箱驱动
d. 以上所有
4. 提高交流发电机的电压的方法有（　　）。
a. 提高转子转速
b. 增加励磁电流
c. 增加换向元件
d. a 和 b
5. 增强电磁铁线圈的强度的方法有（　　）。
a. 增大流经线圈的电流
b. 增加电磁铁线圈的匝数
c. 使用铁心
d. 以上所有
e. 只有 a 和 b

第 7 章　齿轮箱与直驱系统

本章学习目标

读完本章后你将能够：

- 掌握风力机齿轮箱的运行原理。
- 解释风力机需要齿轮箱的原因。
- 辨别五种不同类型的齿轮，并解释其功能。
- 阐述直接驱动风力机系统如何产生 60Hz 电压。
- 了解轴承的功能和运行原理。
- 识别五种类型的轴承。

本章关键词

轴向力（Axial force）
滚珠轴承（Ball bearing）
轴承座圈（Bearing race）
锥齿轮（Bevel gear，Milter gear）
衬套（Bushing）
人字齿轮（Double helical gear）
传动链（Drive train）
传动齿轮（Driven gear）
齿轮啮合间隙（Gear backlash）
齿轮箱（Gearbox）
齿轮传动比（Gear ratio）
斜齿轮（Helical gear）
人字齿轮（Herringbone gear）
高速轴（High-speed shaft）
系列（Journal）
低速轴（Low-speed shaft）
滚针轴承（Needle bearing）
轴台（Pillow block）
行星齿轮（Planetary gear）
齿条（Rack）
径向力（Radial force）
滚柱轴承（Roller bearing）
减速器（Speed reducer）
直齿轮（Spur gear）
轴向负荷（Thrust load）
推力轴承（Thrust bearing）
蜗轮（Worm gear）

本章概述

本章将介绍齿轮箱和部分风力机中的直驱传动系统。风力机叶片连接在轮毂上，当风吹过叶片时，轮毂带动叶片转动。轮毂与转轴相连，将能量传输给发电机。有些风力机的叶片是直接通过传动轴与发电机相连，而在一些大型系统中，与叶片和轮毂相连的转轴首先连接到变速齿轮箱上。这个齿轮箱内部有若干齿轮，可以将叶片的转速调节为发电机运行所需要的速度。本书第 6 章中已经介绍过发电机的相关内容，在美国，发电机转速需要保持在一个特定的值，这样才能发出频率为准确 60Hz 的交流电以实现并网。本章将介绍如何用齿轮箱中的齿轮来调整高速轴的输出，这样，无论

叶片和转子的转速是多少，都能够给发电机提供恒定的输出转速。

本章还将介绍一种发电机，它通过驱动系统直接和叶片相连，并能运行在任何风速下。这种类型发电机发出的电压频率是不受控制的，需要通过电力电子逆变器转换为60Hz的交流电输出。

通过本章学习，读者将会了解到叶片如何通过齿轮、传动比、齿轮箱和传动链将能量传输给发电机，如何安装、诊断和维护这些组件。此外本章还将讨论齿轮箱和传动轴定期维护的必要性以及维护方法。

7.1 齿轮箱的作用

并网型风力机必须发出频率和电压非常稳定的交流电。由于一天中风速时刻变化，叶片也会随着风速变化而相应改变。多年来风速的不确定性给风力发电机组的设计带来了许多问题，设计师们要设计出即使在低风速情况下也能够尽可能多地吸收风能的风力机。风速较低时，叶片转速比高风速时要慢很多。如果叶片直接与发电机相连，意味着叶片的转速变化时刻影响着发电机的转速。正如本书第6章中介绍到的，叶片的转速直接影响着发电机输出交流电的电压和频率水平。

如果风力机应用在需要将输出电压转换成直流电压的场合时，电压频率就变得无关紧要，因为可以用变流器将任何频率的交流电转换成直流电。一些规模较小的风电机组作为独立电源使用时，可以为偏远地点的居民和建筑物提供电力，或将直流电储存在蓄电池中以备使用。直流电只能用于照明和取暖设备，或用于有直流电动机的场合。在这种类型的应用中，发电机可直接和风力机连接，叶片在任何转速下发电机都可以工作。

当并入电网时，风力机发出的电压和频率必须与电网相符。这种情况下，频率和电压的百分比偏差是严格控制在±0.5%以内的。在并网型风力机中，有些风力机需要使用电力变流器，将任何频率和电压等级下的交流电整流成直流，然后再逆变成电压和频率恒定的交流电。这种变流器的设计必须能够在风速最大、叶片转速最高时满足发电机最大输出电能的变换需要。该类型的风力机必须限制叶片的最高转速，以免造成发电机过载或变流器无法控制。如果风力机的最高速度得不到限制，就可能使发电机发出过高的电压和电流，从而导致发电机和变流器过热或严重损坏。

一种控制发电机转速的方法是采用齿轮箱实现叶片和发电机之间的能量传输。齿轮箱内部的齿轮是按特定传动比设计的，当连接叶片的齿轮箱输入轴转速较低时，将会被增至发电机所需的更高速度。发电机需要运行在一个相对高的转速才可以发出60Hz的交流电。例如，为了发出60Hz的交流电，两极发电机必须运行在3600r/min转速下，而4极发电机必须运行在1800r/min转速下。大型商用风力发电机叶片的转速可能会非常慢，处于最佳负荷时大概为10~20r/min。而一些为家庭设计的小规模

风力发电机，风速较高时转速可能达 300 ~ 600r/min。在所有的风力发电机中，上述速度远低于发电机发出特定频率所需要的 1800r/min 转速。

考虑到风速的时变问题和叶片的低速问题，可以通过齿轮箱来调整机组的转速，就与汽车中用齿轮箱来保证发动机转速相对稳定类似，通过不断地改变传动比来调整齿轮箱的输出转速。因此无论叶片转速是多少，都可以通过持续地调整齿轮箱传动比，使风力机保持一个几乎恒定的转速。由此可知，齿轮箱是风力机必不可少的组成部分。图 7-1 为风力机结构，包括叶片、发电机、齿轮箱以及其他一些基本组件。叶片和风轮转子位于风力机的前部，齿轮箱和发电机则靠近机舱尾部，风速计风向仪表位于机舱尾部的顶端，风速计风向仪的作用是检测风向和风速并把信息传输给主计算机或控制器。偏航控制系统由一个环形齿轮和偏航驱动电动机组成，偏航驱动电动机用于驱动安装于塔架顶部的机舱旋进或旋出风向。

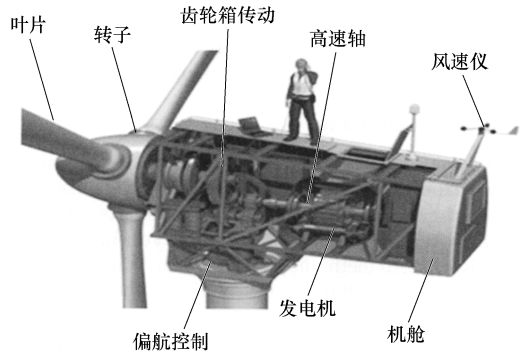


图 7-1　风力发电机基本结构，显示了风力机叶片、齿轮箱和发电机的相对位置，也显示出了在机舱内的安装位置（图片来源：Fotolia @ Stephen Sweet）

在介绍完齿轮箱的安装位置之后，接下来介绍齿轮箱的运行原理和齿轮箱中不同类型齿轮的作用。齿轮箱以及传动轴并不是新的设备，它们很早就应用在一些工业中，如采用大型电动机驱动或发动机驱动的水泵和发电机。多年来齿轮箱也用在大型柴油发动机驱动的大型土方和采矿设备，以及大型卡车和其他类型车辆的传动中。在这些设备中齿轮箱应用广泛，技术日趋完善，可靠性越来越强，即使长时间工作也不需要大修。随着制造业和工业生产中齿轮箱技术不断提高，齿轮啮合误差不断减小，使得齿轮磨损显著减小，齿轮工作寿命大大提高。这些年应用在齿轮箱内的润滑剂和冷却剂的不断改善，也延长了齿轮箱部件的使用寿命。

随着新技术和新设备的出现，叶片、转子和风力发电机之间的定位精确性大大提高，从而减小了因错误定位而引起的振动。齿轮箱的使用寿命也逐渐延长，可靠性也变得更高。本章还将详细介绍齿轮和齿轮箱，使读者进一步了解齿轮的多种功能，如调向、调速、转矩调节和能量传递等。

7.2　齿轮传动比的作用

位于传送系统或齿轮箱中的一系列齿轮之间的齿数比叫作传动比。提供输入能量的齿轮叫作驱动齿轮，跟随驱动轮转动并接收能量的齿轮称为从动齿轮，有时从

动齿轮也被称为随动齿轮。齿轮的作用在于实现驱动齿轮轴和从动齿轮轴之间速度、力矩以及方向的变换。

如图7-2所示，驱动齿轮有10个齿，从动齿轮有30个齿，这个齿轮箱传动比为3:1。驱动齿轮每完成一个完整的旋转循环，从动齿轮将完成1/3个循环㊀。另一种确定两个齿轮传动比的方法是用从动轮的齿数除以驱动轮的齿数，如图7-2所示，驱动齿轮有10个齿而从动齿轮有30个齿，用30除以10得到3，所以传动比是3:1。

传动比很重要，因为它表明了从驱动齿轮传递给从动齿轮的转矩大小。如果知道驱动齿轮的速度，就可以计算出从动齿轮的速度。例如，如果传动比为3:1，驱动齿轮转速为300r/min，那么从动齿轮转速就是100r/min。如果输入驱动齿轮的转矩为200N·m，那么从动齿轮的输出力矩就为600N·m。

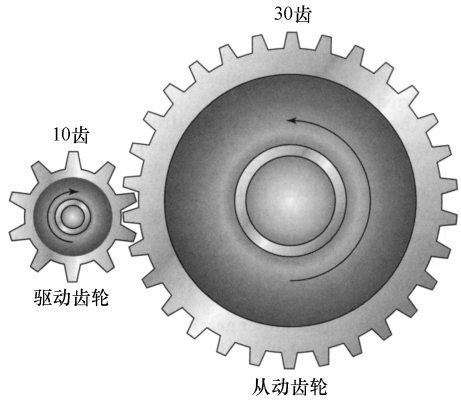


图7-2　驱动齿轮有10个齿，从动齿轮有30个齿，因此传动比是3:1

有时候驱动齿轮齿数和从动齿轮齿数之比不是6:1或2:1之类的整数。例如驱动齿轮有8个齿而从动齿轮有30个齿，那么传动比为15:4或者表示为30:8，这种传动比可以以1为基准表示，因此传动比也可以是小数。例如，驱动齿轮有8个齿而从动齿轮有30个齿，30除以8得到传动比为3.75，可以表示为3.75:1。

如果驱动齿轮有200个齿，从动齿轮有10个齿，则传动比为1:20。一般而言如果传动比为2:1或5:1时，这种齿轮系列在从动轮的输出端将会输出较大转矩和较低转速。如果传动比为1:10或1:20时，在从动轮的输出端将输出较高转速和较小转矩。

如果传动系列有三个齿轮相连，驱动齿轮与中间的齿轮啮合，中间的齿轮称为惰轮（中间齿轮），它和驱动轮的转向相反。第三个齿轮为从动轮也称为输出齿轮，它接收来自惰轮的能量，其旋转方向也和惰轮相反，但是和驱动齿轮方向相同。如果想使驱动齿轮和从动齿轮向同一方向转动，连接在它们中间的惰轮个数应为奇数；如果想使驱动齿轮和从动齿轮以相反方向转动，惰轮个数应为偶数。

7.3　齿轮类型

风力机及其他设备中的齿轮箱一般采用四种常见的齿轮：直齿圆柱齿轮、斜齿

㊀ 原文为“三个循环”，应该为“1/3个循环”。——译者注

圆柱齿轮、人字形锥齿轮和蜗轮。直齿圆柱齿轮上的齿经垂直切削而成，并与齿轮轴平行，通过选取驱动齿轮和从动齿轮的齿数，构成适合产生特定速度或驱动力的传动比。驱动齿轮把能量传入到系统中，从动齿轮跟随驱动齿轮动作。另一种类型的直齿圆柱齿轮是一个驱动齿条的小齿轮，用于在一些运动控制中将旋转运动转换为直线运动。这种类型齿轮的齿数决定了传递到齿条上的转速和转矩。

斜齿圆柱齿轮的驱动轴可以像直齿圆柱齿轮一样与从动轴平行，或者相差90°。斜齿圆柱齿轮的齿以一个角度切割加工而成。驱动齿轮和从动齿轮的齿数也同样决定了输入、输出速度和转矩的关系。斜齿圆柱轮增强了齿的强度，和直齿圆柱齿轮相比提高了齿间啮合度。同时斜齿圆柱齿轮还可以提供比直齿圆柱齿轮更大的承载力。

人字锥齿轮是风力机中采用的第三种类型齿轮，在这种齿轮中齿的切割角度类似于斜锥面。这种设计降低了齿轮传输中的齿间磨损，而且这种类型齿轮运行时比其他类型更安静。相对于其他类型齿轮，人字锥齿轮运行转速更高，磨损更小。

第四种类型的齿轮称为蜗轮，这种齿轮的输入轴与输出轴正交（90°），齿轮体积小但传动比高，应该是噪声最低的齿轮。

7.3.1　齿轮的运行原理

机器中齿轮是用来传输轴与轴之间的能量，实现速度变换、转向变换或者获得更大的转矩等。例如，有 10 个齿的驱动齿轮和 20 个齿的从动齿轮，驱动轴会有两倍于从动轴的速度，而从动轴将会有两倍于驱动轴的转矩。两个齿轮的齿数比决定了它们之间的速度比和转矩比。另外有一点需要指出，如果两个齿轮（驱动轮和从动轮）啮合工作时，驱动轮和从动轮将向相反的方向运动，每增加一个齿轮，从动轮的旋转方向就会改变一次。驱动轴与从动轴可相互平行，也可以有一个角度差，根据不同的应用需求而定。在下一节中将会给出更详细的讨论和相关例子。总之，所有的齿轮设计都是基于损耗最小、效率最高的原则。

7.3.2　齿轮的种类

当今工业应用的齿轮大致可分为三类，每一种又包含了许多不同子类型。表 7-1 列出了三类齿轮：平行轴齿轮，其中驱动轴和从动轴相互平行；交叉轴齿轮，其中驱动轴和从动轴以某个角度（如 90°）相交；第三种是不平行不交错齿轮。

表 7-1　齿轮种类和效率

齿轮类别	具体例子	效率(%)
平行轴齿轮	直齿轮 齿条 内齿轮 螺旋齿轮 螺旋齿条 双螺旋齿轮	98 ~ 99.5

（续）

齿轮类别	具体例子	效率(%)
交叉轴齿轮	锥齿轮 螺旋斜齿轮 正斜齿轮	98～99
不平行不交错齿轮	蜗轮	30～90
	螺旋齿轮	70～95

7.3.3 直齿圆柱齿轮

直齿圆柱齿轮（简称直齿轮）在相互平行的两轴之间实现能量传递，图 7-3 为两个直齿圆柱齿轮。从图中可以看出这种齿轮的齿与齿轮端面呈 90°，一个齿轮的齿必须与另外一个齿轮的齿准确咬合。直齿圆柱齿轮是一种低成本的齿轮，用于中等速度运转的一般性负荷（最高达到 4000r/min）。如果速度过高，这种齿轮运行时噪声会变得很大。直齿圆柱齿轮成本比较低且不需要特殊保养，所以使用最为广泛。

图 7-4 为带有三个直齿圆柱齿轮的传动系统，安装在驱动轮和从动轮之间的中间齿轮为惰轮，作用是使从动齿轮和驱动齿轮转向相同。如果只使用两个齿轮，那么这两个轴的旋转方向是相反的。如果使用三个，那么第一个和最后一个齿轮的转动方向相同，而中间的惰轮以相反的方向转动。如果该系统同时用于增大转矩或提升速度，每一个齿轮的齿数也可以相应地变化。

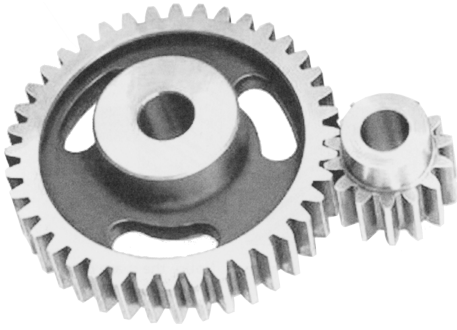


图 7-3 直齿圆柱齿轮，驱动轮以一个方旋转，从动轮以相反方向旋转。左边的驱轮将使右边的从动轮高速旋转。转速比等于传动比（图片来源：Amerson 工业自动化部，能量传动解决方案）

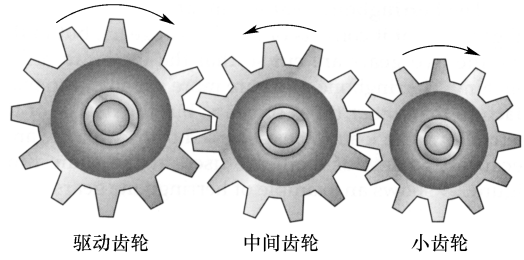


图 7-4 通过添加惰轮使传动轮和驱动轮的旋转方向一致的直齿圆柱齿轮系统。驱动轮顺时针方向旋转，惰轮逆时针方向旋转，从动轮顺时针方向旋转，和驱动轮同向

7.3.4 有齿条的直齿圆齿轮

在实际中会遇到称为齿条齿轮的另一种类型的直齿圆柱齿轮，其中齿条是用来把旋转运动转变为直线运动。当驱动齿轮转动时，直齿圆柱齿轮的齿就会与齿条的

齿啮合，使齿条进行直线运动。当驱动齿轮的轴反转时，齿条也反方向运动。图 7-5 为一个带有齿条的直齿圆柱齿轮例子。这种类型的齿轮配置可以使用在小型的工具中，把直线运动转换成旋转运动。例如，一个电位器或编码器的转轴可以连接到圆柱齿轮的轴上，当齿条进行直线运动时，圆柱齿轮进行旋转运动，从而旋转编码器或电位器产生一个信号来表明轴的移动量。在风力机中，这种工作原理被用于检测风向的测风仪器中。

在一些风力机中，这种类型的装置用于实现偏航操作。机舱安装在一个类似于齿条的大型圆柱齿轮圈上，而一个直齿轮安装到偏航控制电动机的转轴上。当偏航电动机驱动直齿轮转动时，大型圆柱齿轮圈也随之转动，从而使风力机的机舱转动旋入或旋出风向。

7.3.5　斜齿圆柱齿轮

斜齿圆柱齿轮（简称斜齿轮）也用在驱动轴和从动轴互相平行的场合中，图 7-6 为两个斜齿圆柱齿轮。斜齿圆柱齿轮的齿以与齿轮端面呈一个角度的方式切削加工而成，该角度称为齿轮节距（角）。斜齿圆柱齿轮的齿轮节距可以从很小的角度变化到 45°。由于斜齿圆柱齿轮的齿相对齿轮端面呈一个角度，其齿的长度比直齿圆柱齿轮稍微长，所以能传输更多的负荷，而且工作噪声比直齿圆柱齿轮小得多。当两个斜齿圆柱齿轮配合使用时，通过两齿轮不同的齿数来提供不同的传动比，进而改变速度或者转矩。斜齿圆柱齿轮的另一个重要特点是它会产生沿转轴方向的推力载荷，需要采用专用的轴承来抵消。

图 7-5　带有齿条的直齿圆柱齿轮。随着直齿齿轮的旋转，齿条沿着直线运行。这种齿轮将旋转运动变为直线运动，或者将直线运动变为旋转运动（图片来源：Amerson 工业自动化部，能量传动解决方案）

图 7-6　两个斜齿圆柱齿轮，齿轮的齿与端面呈一个角度切割（图片来源：Amerson 工业自动化部，能量传动解决方案）

7.3.6　交错轴斜齿轮

交错轴斜齿轮（螺旋齿轮）类似于斜齿圆柱齿轮，其共同点是齿均与齿轮端面呈一个斜角。然而，交错轴斜齿轮中这两个齿轮是互相垂直的，使得驱动轴和从动轴可以以 90°的方位关系运行。类似地，驱动齿轮和从动齿轮的齿数也同样构成了传动比，决定了速度和转矩的变换关系。图 7-7 为一个交错轴斜齿轮的例子。

7.3.7 双斜齿圆柱齿轮和人字锥齿轮

另一种用来抵消推力载荷的方法是使用双斜齿圆柱齿轮，图 7-8 为一个双斜齿圆柱齿轮的例子。从图中可以看到，在两个斜齿齿轮中，一个斜齿轮的所有齿均以同一个相对齿轮端面角度切削而成，而另一个斜齿轮的所有齿则采用相反方向角度。这样的设计，就是通过一组齿产生的推力把另外一组齿产生的相反方向的推力抵消。斜齿圆柱齿轮也可通过齿条将旋转运动转换为直线运动。与采用直齿圆柱齿轮的齿条齿轮相比，采用斜齿圆柱齿轮可以实现更多功率传输。

图 7-7 交错轴斜齿轮。该齿轮可以使两个转轴相交 90°角旋转（图片来源：Amerson 工业自动化部，能量传动解决方案）

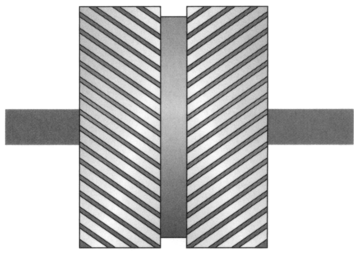


图 7-8 双斜齿圆柱齿轮。在两组齿间有一定的空隙

双斜齿圆柱齿轮由两个相反旋向的齿轮组成，两个齿轮中间有一段间隙，这种齿轮的优点是消除了轴向推力。双斜齿齿轮动力传输性能较好，因为和传统齿轮相比，它有两倍的齿数和两倍的表面积。如果两个齿轮之间的间隙足够宽的话，这种类型的齿轮可以由一块金属材料做成。如果空间有限，双斜齿圆柱齿轮可能是由两块金属做成。双斜齿圆柱齿轮驱动负荷是通过两套齿轮而非一套。

人字锥齿轮类似双斜齿圆柱齿轮，它也是由两个斜齿圆柱齿轮组成，但这种齿轮在两个齿轮交汇处没有间隙，可以严密啮合。人字锥齿轮的制造成本比其他类型的齿轮更高，由于同时使用两套齿轮，这种设计使负荷可以分布在两倍面积的区域上。图 7-9 为一个人字锥齿轮的例子。

7.3.8 锥齿轮或等径锥齿轮

图 7-10 为两个锥齿轮的例子，这种齿轮应用在驱动轴和从动轴相交大约 90°的情况下。在所有齿轮设计中，锥齿轮功率传递效率最高，但还需要明确指出锥齿轮的空间使用局限性，即两轴必须相交于 90°左右。锥齿轮的两轴夹角不一定是准确的 90°，在一些应用中两轴相交角度小于 90°，而在另外一些应用中两轴相

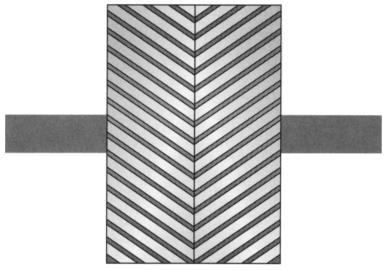
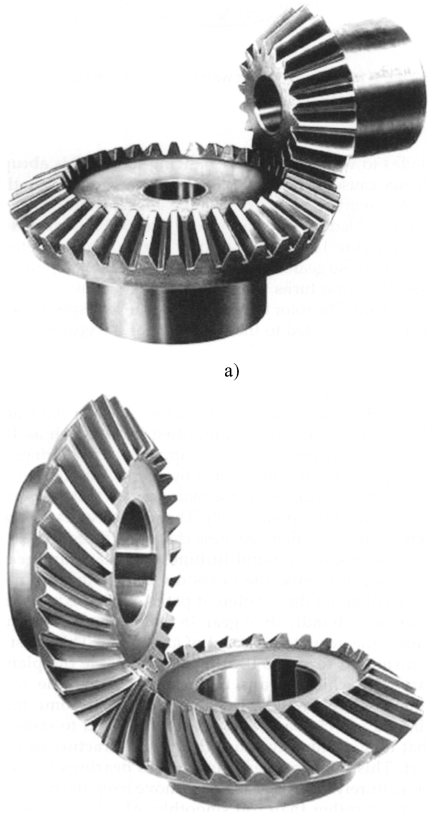


图 7-9 人字锥齿轮

交角度略大于 90°。如果锥齿轮中两个齿轮是同样大小并恰以 90°相交安装时，这种锥齿轮可以称为等径锥齿轮。

7.3.9　蜗轮

图 7-11 为一个蜗轮的例子，蜗轮由一个圆柱形蜗杆与一个啮合齿轮构成，蜗轮的一个典型应用是蜗轮减速机。在这种类型的装置中，蜗杆通常是驱动轮而齿轮是从动轮。这种齿轮的主要特点是降速幅度大（100∶1），且外形小巧。比起其他类型齿轮，蜗轮的蜗杆部分在机械性能方面具有一些优势，但同时也带来了效率的损失。使用蜗轮的另一个原因是其表面积较大，使蜗杆和齿轮在旋转期间能够保持较好的接触，这使得它在运行时没有噪声并且可以吸收较高的冲击负荷。蜗轮用在风向偏航控制系统中，齿轮安装在机舱尾部，圆柱蜗杆安装在驱动电动机上。当需要改变机舱和风轮方向来调节叶片的进风量时，就发送一个信号到驱动电动机使蜗杆旋转，进而通过齿轮传动改变机舱的迎风角度。在此过程中采用计算机或可



a)

b)

图 7-10　a）锥齿轮　b）等径锥齿轮（图片来源：Amerson 工业自动化部，能量传动解决方案）

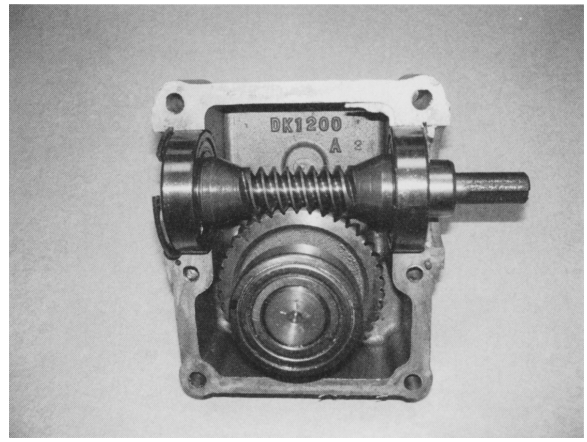


图 7-11　蜗轮蜗杆

编程序控制器（PLC）进行控制调节，通过比较机舱现在的方位和风向仪传来的风向信息，计算出机舱需要转动的角度。偏航控制可以把机舱调向来风方向，或在过负荷或超速时调出来风方向。

蜗轮效率一般很低，会消耗掉一些驱动功率。例如若需要 1hp 驱动负荷，当使用蜗轮时驱动电动机的功率可能需要超过 2hp。蜗轮的其他问题是工作时会产生一些轴向推力，这就需要使用更昂贵的轴承来抵消轴向推力；而且蜗轮运行过程中会产生很多的热量，必须通过特殊的润滑来散热。

7.4 斜齿行星齿轮

图 7-12 为在风力机中可能用到的大型行星齿轮，图 7-13 为行星齿轮的内部结构。行星齿轮中内部的齿轮称为太阳齿轮，它通过一系列较小的行星齿轮与外部的环形齿轮相啮合。就像斜齿圆柱齿轮一样，行星齿轮中所有齿轮的齿与齿轮端面均呈斜角（斜齿）。外部环形齿轮绕着太阳齿轮旋转，就像行星绕着太阳系的太阳旋转一样，行星齿轮由此而得名。

图 7-12 行星齿轮（图片来源：NKE Bearings）

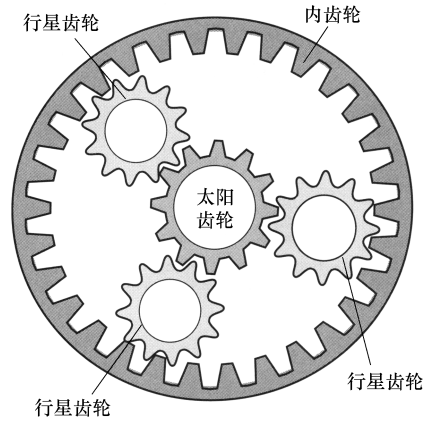


图 7-13 行星齿轮的内部结构

行星齿轮比较适合应用于风力发电机齿轮箱中，因为它有很多优点。行星齿轮输入轴和输出轴可以平行并且同向旋转，这意味着齿轮箱和发电机可安装在一条直线上。行星齿轮适用于风力机齿轮箱的另一个原因是对齿轮进行特殊设计后可以承受风力机频繁出现的极端负荷。某一瞬间风速可能是 10mile/h，但几分钟后可能突然出现超过 30mile/h 的阵风，这会使叶片承受严重而多变的负荷，这种突变会给叶片、转轴和齿轮箱施加极大应力。大型风力机的风轮直径可超过 300ft，能提供（1～2）万 lbf·ft 转矩。行星齿轮箱能够提供 75∶1 或 100∶1 增速比，转子通过低速轴连接到齿轮箱输入轴，而发电机通过高速轴连接于齿轮箱输出轴。风驱动风轮旋转的速度为 10～20r/min，经过齿轮箱增速可提高至 1800r/min 转速。

如果齿轮箱传动比为 75:1 或 100:1 时，任何轻微风速的变化将都会被放大 100 倍。同样如果有任何不正常的力作用到轴承或齿轮上，它们也会被放大 100 倍，这也是齿轮和轴承过早磨损的主要原因。行星齿轮能够有效限制上述作用产生的损害。

理论上讲，风力机齿轮箱采用行星齿轮，可将输入的转矩通过三条不同的路径传递，减少了每个齿轮的负荷转矩。实际中，高转矩使得齿轮的啮合变形，这种变形被传送到行星齿轮内部的轴承，这意味着它们之间负荷分配不平均。其结果就是当齿轮存在对中偏差时，冲击负荷和其他导致应力的力矩最终可能导致齿轮断裂或扭曲。这种错位会因为齿轮工作在不正常工作情况下而导致轴承过早磨损。如果定期维护没有发现问题，所有这些因素将导致齿轮箱过早磨损甚至彻底损坏。齿轮箱安装在塔顶部的机舱里，技术人员必须爬上塔顶并确保安全情况下才能进行维修，因此风力机齿轮箱的定期保养费用高昂且检修耗时长。

7.4.1　行星齿轮的优缺点

行星齿轮为风力发电机组解决了许多问题，但也依然存在一些问题，表 7-2 列出了行星齿轮的优点和缺点。

表 7-2　行星齿轮的优点和缺点

优点	缺点
传动比高，通过低速轴连接叶片高速轴连接发电机传输能量	如果发生错位可能导致轴承和齿轮过早磨损
转矩通过多个齿轮而不是一个齿轮传输	增加了额外的定期检查费用
比起同样大小的其他齿轮更坚固	有磨损时会产生较多的噪声
可以提高叶片低转速旋转时的效率	
可靠性比其他类型齿轮高	

7.4.2　为风力机专门制造的其他一些齿轮

新的风力机齿轮箱设计中已采纳了新技术来消除误差和行星齿轮组过早磨损引起的一些问题。一些公司为风力机生产专用的齿轮箱，通过改进轴承负荷分配和消除偏差等措施，大大提高了风力发电机组的可靠性。

行星齿轮通过把行星轮固定在行星轮支座上限制相互之间的负荷，最终均衡各行星轮之间的负荷分布。图 7-14 的轴承能用来保证齿轮箱内的齿轮精确对准。这种类型的轴承是专门为工作在恶劣环境下，负荷和转矩不断变化的风力机设计的，可大大延长风力发电机组齿轮箱的使用寿命。关于轴承的详细内容将在下一节介绍。

7.4.3　齿轮啮合和齿隙

维护技术人员经常碰到的一个问题是齿轮运行时齿间不正确啮合或齿隙（齿轮啮合间隙）过大。齿隙指的是两齿啮合后齿间存在的较小的间隙，齿隙是正常的同时也是必要的。图 7-15 为一个典型的齿轮运行间隙，从图中可以看到齿和齿

之间的啮合方式。齿轮的啮合深度必须非常精准，齿轮的齿间要有少量的间隙，如果没有足够的间隙，齿轮会过早磨损。

图 7-14　用于风力机齿轮轴的轴承（图片来源：NKEBearings）

图 7-16 显示了如何测量齿隙，从图中可以看到少许的间隙是允许的。为了减小齿轮磨损，间隙量一般选取允许的最大值。随着齿隙的增加，齿轮也逐渐开始振动，齿轮的过度振动会引起速度或旋转方向的改变。如果齿轮连接到一个由伺服系统控制的电动机上，伺服系统的计算机试图补偿齿隙带来的振动，实际上这将使齿轮振动更严重。这时控制系统必须能够适应当前齿隙并调整转矩，使齿轮能够正常工作，即使对齿轮有磨损。

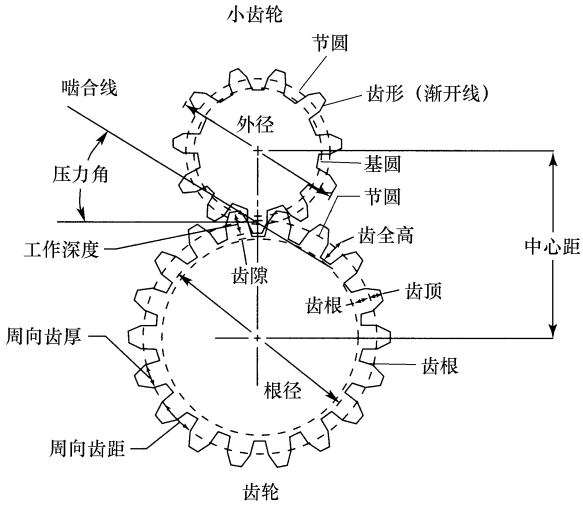


图 7-15　齿轮啮合示意图
（图片来源：Boston Gear）

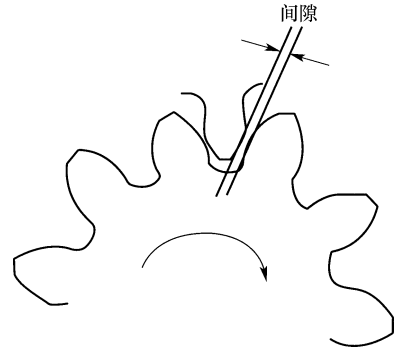


图 7-16　齿轮的间隙测量
（图片来源：Boston Gear）

齿轮的检查程序包括测量齿隙并确保其符合要求的过程。如果齿隙逐渐增加，可以通过添加垫圈或推力垫片来减少间隙量。这些器件有助于减少间隙，但一般都

只是暂时性的措施，有条件时尽量更换新的齿轮才可以彻底解决问题。

7.4.4　齿轮故障诊断

齿轮箱工作时会出现齿轮磨损和噪声等问题。当齿轮磨损时，其齿间啮合会出问题，从而将无法进行能量的正常传输。当发生这种情况时，齿轮的驱动轴或从动轴就会振动，同样的问题也会出现在齿轮润滑不足或润滑不良的时候。在某些情况下，可以通过增加润滑使齿轮系统恢复正常工作状态。但如果齿轮已在润滑不良状况下持续工作了较长时间，即使添加润滑剂后，转轴也会继续振动，这时需要仔细检查，必要时进行更换。严重的振动也可能是由对中误差或者过大的轴向误差造成的。

如果两个齿轮中任何一个齿轮发生轴承磨损、坏齿或者存在转轴对中误差时，齿轮系统将逐渐黏合而不仅是振动。齿轮发生黏合现象的第一个提示是电动机过负荷跳闸，即使当复位故障电动机重启后可能运行几个小时或更短的时间又发生过负荷跳闸，这是由于齿轮黏合而引起的电动机过负荷造成的。通过观察驱动电动机和接收功率的设备之间的能量传输是否平滑来判断齿轮黏合是否发生。当电动机旋转困难时，还能观测到电动机发生过电流现象，如果尝试手动转动转轴，会发现一些位置转动轻松，而另一些位置转动不轻松。当把转轴转到有黏合的位置上时，可以看到导致黏合的齿。这时可能因无法修复已经磨损了的齿而不得不更换齿轮装置。

7.5　轴承

轴承是用于确保齿轮处于正确的工作位置，尽量减少运动部件之间的摩擦，同时当机器运转时轴承也可用来减少振动。运动部件之间的相对运动可能是直线式或旋转式的，任何与机械应用相关的工程中都会遇到轴承，如风力机等。在实际中必须能够识别每一种轴承类型，解释轴承的工作原理以及拆卸和更换方法。本节介绍了风力机中使用的各类轴承，分析了评估轴承正常工作的方法，讲述了正确拆卸和更换轴承的方法。

7.5.1　轴承的重要术语

本节介绍一些跟轴承相关的术语，这样有助于理解轴承的一些设计特点。图 7-17 为一个轴承结构图，图中对几个重要的术语进行了标注。在轴承术语中，图 7-17 中，a 表示轴承的基座，是轴承内部与转轴配合的部件，在一些应用中该部分需要进行抛光处理以确保轴承与转轴之间的紧密配合。图 7-17 中 b 是用一根方向线表示的轴向力，指的是沿轴方向作用的力。径向力用 c 表示，指从轴承或转轴中心向外施加的力量，例如车轮辐条对轴承外侧的作用力。推力是指对轴承的一侧施加的力量，图中用 d 表示，图中指向远离轴承的方向，但也可以表示为一种施加于轴承内侧的外在力量。

7.5.2　滑动轴承（轴衬）

当参与风力机齿轮和轴承的相关工作时会发现，轴承是为了满足滚动和滑动而设计的。为滑动负荷而设计的轴承可以通过负荷类型来分类，负荷类型有轴向负荷和源自轴心的所谓径向负荷。为滚动负荷而设计的轴承可以通过轴承中采用的支撑元件分类，有滚珠轴承、滚柱轴承和滚针轴承等。

本节所讨论的第一种滑动轴承是为滑动负荷而设计的轴衬。通常情况下该类型的轴承用于轻负荷，如图 7-18 所示，从图中可以看到滑动轴承其实是一个支撑轴的坚实的金属片。滑动轴承的设计很简单，它没有运动部件，在轴承和转轴表面之间采用了薄膜润滑。润滑剂可以尽量减少两个表面之间的摩擦，但始终存在适量的摩擦，因此通常采取一些方法使润滑剂能够均匀分布在轴承所有表面。例如采用有凹槽的衬套，可以使轴承与转轴的所有表面都涂有润滑剂。这种类型的轴承出现故障的唯一原因就是缺少了润滑剂。

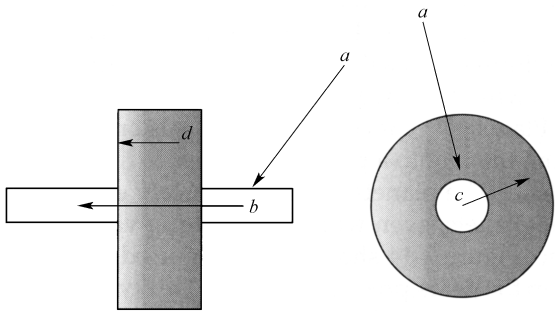


图 7-17　轴承结构及受力示意图

图 7-18　轴衬（图片来源：Boston Gear）

滑动轴承（轴衬）一般安装在轴台中，图 7-19 所示是一个典型的轴台。轴台用来固定承受轴向和径向负荷的衬套。轴台是由两个安装孔（或槽）来固定的，为了能够调整安装到转轴上的传动带或链的张力，安装孔要采用合理的开槽方式。此外，安装孔也应该允许调整轴台位置，来最大限度地减少转轴的振动并确保转轴对中性。图 7-20 是一个基本的轴承单元，包括一个用于适配转轴的轴衬以及安装轴衬的轴台。轴承单元使轴承定期维护或出现故障时的更换变得更容易。

图 7-19　安装轴衬的轴台，注意轴台上的润滑口（图片来源：Boston Gear）

还有一类在设计上采用分割方式的分

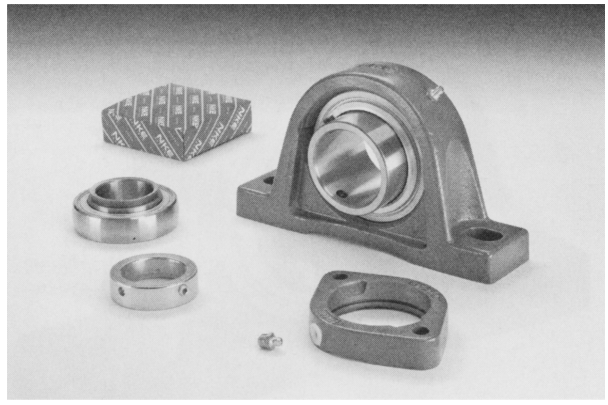


图 7-20　轴承基本单元结构（图片来源：NKEBearings）

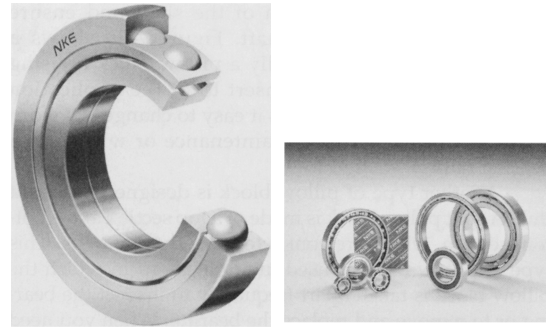
离式轴台，它分为上半部分和下半部分，通过螺栓组合到一起。这种类型的轴台适合用在需要经常拆除和更换轴承的场合。当检修轴承时，将轴台的安装螺栓卸开就可以取下轴台顶部。当轴台的上半部分被卸载后，装有轴承的轴就可以被取出，可以用轴承拆卸器来卸下轴承。当要安装新的轴承时，可以先更换轴台下半部分转轴和轴承，当轴承正确安装在轴台上后，再更换轴台上半部分的轴承，最后重新安装螺栓。如果转轴上装有带轮或链条轮，则需要设置适当的张力后再拧紧螺栓。

7.5.3　滚动轴承

滚动轴承主要有以下三种：滚珠轴承、滚柱轴承和滚针轴承。每种轴承都有一个内圈和一个外圈，共同称为轴承座圈。轴承内圈用来支撑内部的转轴和位于其外侧的滚球和滚柱等支撑元件。轴承外圈则用来与内圈一起限制滚珠和滚轴，轴承座圈的材料一般采用硬化钢。

7.5.4　滚珠轴承

图 7-21 和图 7-22 所示为典型的滚珠轴承及结构，从图中可知滚珠轴承是由一个内圈、一个外圈、一个滚柱保持架和数个滚珠组成。内圈尺寸决定了轴承内腔的大小，轴承的内腔必须与转轴的外径匹配，滚珠通过轴承保持架固定在轴承内。保持架设计可以使每个滚珠与内圈和外圈紧密接触，同时也可以防止滚珠松动脱落。如果轴承保持架受损，就可能使轴承的一个或更多滚珠跌落。外圈限制滚珠和内圈紧密接触而不脱落，其尺



a)　　b)

图 7-21　a）典型滚珠轴承剖视图 b）滚珠轴承例子（图片来源：NKEBearings）

寸也决定了轴承的外径。

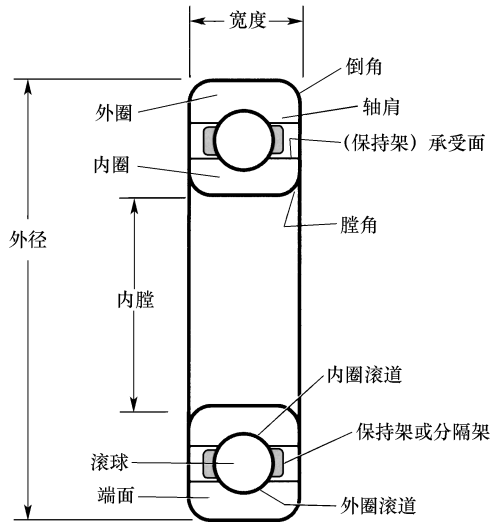


图 7-22　滚珠轴承的结构，包括内圈、外圈、保持架和滚珠（图片来源：Boston Gear）

轴承的侧面叫轴承端面，有时采用工具施加一个沿轴到轴承端面的作用力把轴承安装到正确位置。在把轴承固定到转轴的过程中，必须保证不损坏轴承端面或者挤压到位于保持架内的滚珠。

有一种重型滚珠轴承被称为双列滚珠轴承，这类轴承是在两个并列的深槽中放置滚珠。图 7-23 为一个双列滚珠轴承的示意图，相对于单列滚珠轴承而言，双列滚珠轴承可以减少摩擦，因为它具有双倍的滚珠数。

图 7-23　双列滚珠轴承（图片来源：NKEBearings）

7.5.5　滚柱轴承

滚柱轴承不同于滚珠轴承，滚柱是用看起来像小钢管的实心钢柱做成的。滚柱轴承的主要特点是提供了一个较大的滚动面，可以承受更大的力。滚柱轴承也可以

承受风力机频繁起动、停止或风速急剧变化时引起的冲击负荷。滚柱轴承是由内圈、外圈和滚柱组成的，保持架保证滚柱位于轴承圈内。滚柱轴承存在的一个问题不能像滚珠轴承那样连续跟随负荷的变化。滚柱如果以一个小的斜角安装时，滚柱轴承就可以同时承受轴向力和径向力，这类轴承称为圆锥滚柱轴承。图 7-24 为一个圆锥滚柱轴承的例子，其中座圈用于安放滚珠，并提供了圆锥滚柱轴承的配合面。

图 7-24　圆锥滚柱轴承（图片来源：NKEBearings）

另一种类滚柱轴承是双列滚柱轴承，这类型的滚柱轴承有两列独立的滚柱共同承担载荷。这类轴承磨损小，同时能够带动更大的负荷。图 7-25 为一个双列圆锥滚柱轴承的例子。

7.5.6　滚针轴承

第三种滚动轴承叫作滚针轴承，该类轴承只有外圈没有内圈，这种结构使滚针直接和转轴相接触。这种轴承的滚子称为滚针，因为它比传统的滚柱直径小得多。相对其他类型的滚动轴承，滚针轴承能以更高速度承载较大的径向负荷。滚针轴承需要有保持足够的润滑，需要频繁检查其润滑状态，这一点是非常重要的。

图 7-25　双列圆锥滚柱轴承（图片来源：NKEBearings）

7.5.7　推力轴承（垫圈）

推力轴承是用来专门承受轴向力的专用轴承。图 7-26 为一个推力轴承的例子，图 7-27 为推力垫圈的例子。可以看到，图 7-26 中的轴承看起来类似于其他类型的轴承，但它是专门为吸收推力负荷而设计的。推力垫圈这种特殊的垫圈能承受轴向巨大负荷，起到限制轴向运动的作用，推力垫圈一般与滑动轴承或衬套配合使用。推力轴承可以安装到轴肩上，在一

些应用中，有时需要两个或两个以上的推力轴承来保证轴肩和衬套之间所需空间。如果一个推力垫圈磨损，就需要添加另外的推力垫圈。如果拆卸安装有推力垫圈的转轴时，要确保所替换的推力轴承的清洁和润滑，也需要确保推力轴承能够正确安装在转轴原来的位置上，使其能够正常发挥作用。

图 7-26　推力轴承（图片来源：NKEBearings）

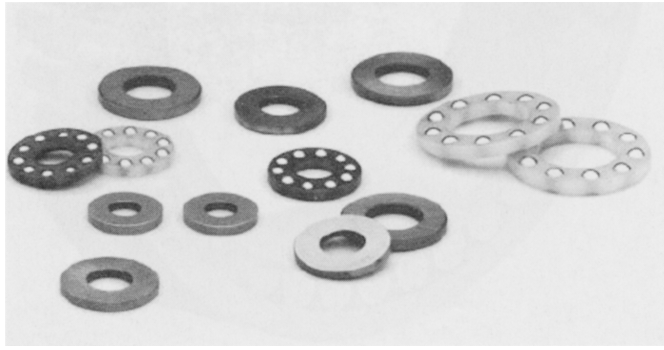


图 7-27　推力垫圈（图片来源：Boston Gear）

7.5.8　轴承和齿轮的维护

参与风力机维护工作时，有时需要检查噪声和磨损过大的轴承。如果需要拆卸或更换轴承，就需要用轴承或齿轮拆卸器。图 7-28 为一个典型的拆卸器，注意到拆卸器是由数个从后方勾连轴承或齿轮的钩爪，以及位于拆卸器中间的一根螺纹轴共同组成。图 7-29 是一个液压拆卸器。当钩爪移动到合适位置时，扳动液压起动杆就可以沿着拉力方向将轴承拆卸下来。不同尺寸的钩爪可以用于不同尺寸的轴承。在一些应用中，转轴上有与轴承相连的齿轮，必须先拆卸齿轮后才能拆卸轴承。

7.5.9　轴承扳压设备

在要借助一定的压力将轴承从轴圈中拆下的一些场合，需要采用轴承扳压设备。轴承扳压设备有时采用液压提供足够的操作压力，一个典型的轴承扳压设备如

图 7-28　轴承及齿轮拆卸器
（图片来源：Harbor Freight）

图 7-29　液压轴承拆卸器
（图片来源：Harbor Freight）

图 7-30 所示。对于较小的轴承可用图 7-31 所示的手扳压机，既可以拆除轴承，也可以将轴承重新安装到转轴上。使用扳压设备时，要确保拆除和更换轴承时采用合适的压力，这样就不会损害轴承表面，否则将导致新轴承快速磨损。

图 7-30　液压式轴承扳压器
（图片来源：Harbor Freight）

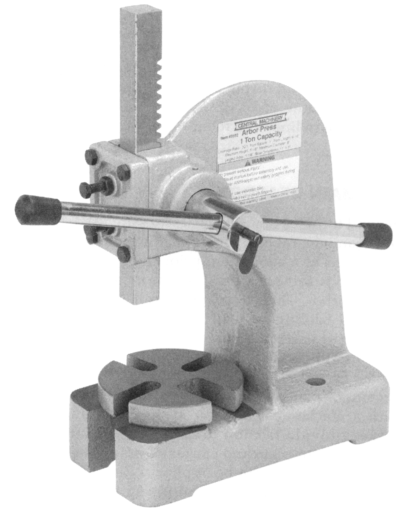


图 7-31　杠杆式轴承扳压器
（图片来源：Harbor Freight）

7.6 差动齿轮箱与直齿圆柱齿轮

差动齿轮用于两轴相交成90°而非平行的场合，图7-32为一个典型差动齿轮。图中齿轮箱的箱盖已经去掉，可以看到齿轮箱底部的输出轴和齿轮箱左上方凸出安装的输入轴，两轴夹角为90°（直角）。一般使用直齿轮和斜齿轮来构成这一装置，但在一些差动齿轮中，斜齿轮比直齿轮使用得更多。通过增加或减少齿轮的齿数，可以改变传动比从而改变传输的转速和转矩。图中也显示了齿轮箱内承载每根转轴的轴承的位置。如果将差动齿轮箱应用于风力机中，它可以使发电机装在叶片的下面或侧面，而不用与之平行。

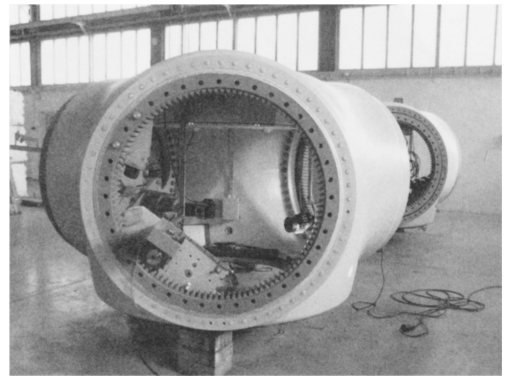


图7-32 转子上的齿圈（图片来源：EWT International）

7.7 主齿轮箱

风力机中的齿轮箱是一个不可缺少的重要组成部分，这是一个在安装到风力机之前就需要制造和装配好的集成系统。图7-33是一个大型齿轮箱，这种齿轮箱自身有润滑和冷却系统，可以作为一个自备系统运行。齿轮箱可以根据不同需求采用液体冷却或空气冷却。图7-34显示了在前端装有一个大转盘的另一种齿轮箱。这个转盘可以用于机械制动，通过连接在大转盘上的机械摩擦片制动器使齿轮系统减速。制动器可以承受很强的力量使转轴停转，尤其是当风力机需要停机检修或面临超速损坏的危险时。

图7-34是风力机齿轮箱剖视图，安装在齿轮箱内的齿轮将功率传递到发电机的高速轴。行星轴承和高速轴承是齿轮箱中保障功率传递过程中转轴振动最小的重要部件。

图7-35以周期性维护时从探测口观察的视角显示了主齿轮箱中的齿轮。齿轮箱中的斜齿轮允许低速轴和高速轴相互平行安装，从而使叶片、低速轴、主减速器、高速轴和发电机全部安装在一条直线上。低速轴把风轮连接到齿轮箱上，而高速轴将齿轮箱连接到发电机上。图7-36为这种齿轮装置的照片，输入轴安装在齿轮的右侧，输出轴安装到齿轮箱的左侧。最左边是大型行星齿轮，中间及右侧为斜齿轮。

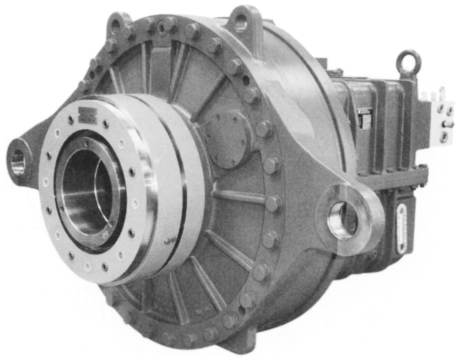


图 7-33　完整的风力机齿轮箱
（图片来源：Bosch Rexroth Group）

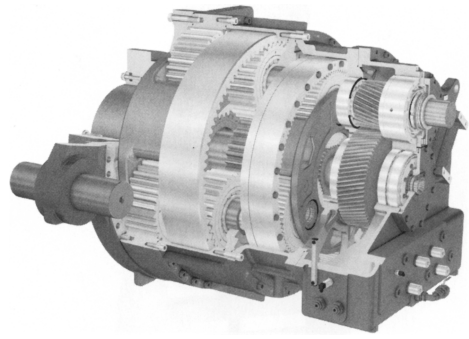


图 7-34　风力机齿轮箱剖视图
（图片来源：Bosch Rexroth Group）

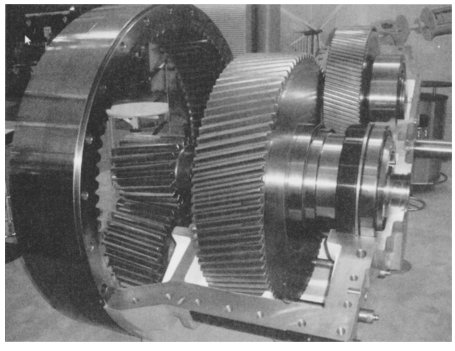


图 7-35　风力机齿轮箱中的斜齿轮
（图片来源：Kidwind Project）

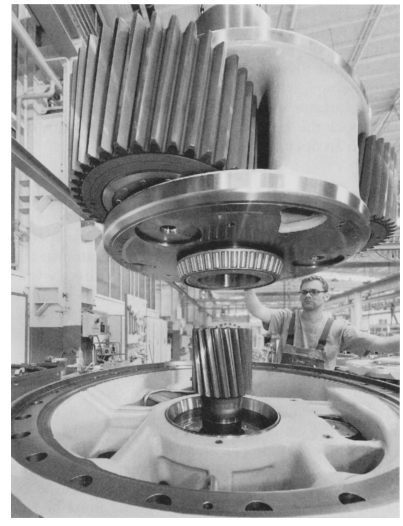


图 7-36　风力机齿轮箱中的齿轮
（图片来源：Bosch Rexroth Group）

7.8　传动链

风力机的传动链包括叶片、转子、低速轴、齿轮箱、高速轴和发电机。该系统使风力机的叶片能够吸收风能，通过转轴和齿轮箱将能量传送到发电机转换为电能，图 7-37 为卧式风力机的传动链结构图。制动系统也是传动链的一部分，在必要时能够及时停止发电机和叶片的旋转。

7.8.1　传动链的安装方式

传动链部件都安装在机舱底座上，底座由一个能支撑所有组件的金属板构成，

这样所有的组件可以安装在一起。在许多系统中，风力机转子叶片、齿轮箱和发电机都是各自为一个子系统。经过启动测试之后，它们作为装配好的单元吊装到风力机机舱内。这个过程保证了这些组件分别作为子系统首先进行对中和装配测试，并且尽可能地消除振动。有些风力机制造商使用试验台测试这些组件在正常运行和满负荷情况下的运行状况，若有问题在地面上就可以及时做出调整。图 7-38 为一个待测试的由齿轮箱和发电机构成的单元。

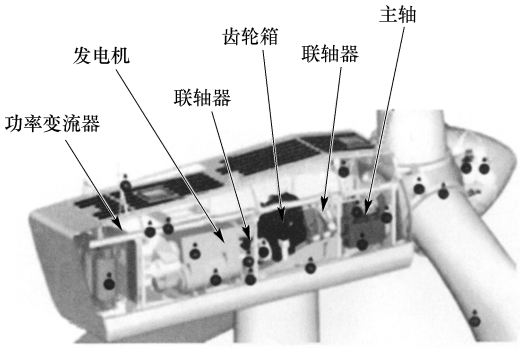


图 7-37　卧式风力机的传动链

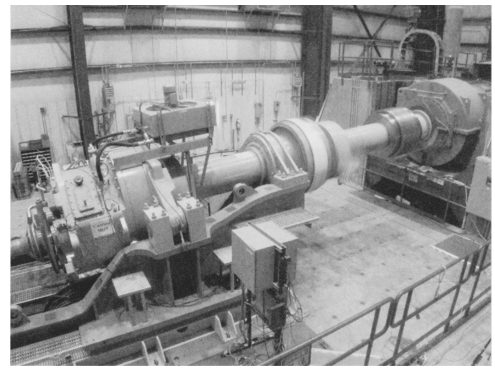


图 7-38　组装在一起的齿轮箱和发电机
（图片来源：美国能源部 NREL）

7.8.2　传动链同轴对中

传动链调中是指传动链所有组件的正确同轴对中。如果其中任何一个组件不能很好地对中，会导致转动轴的不正常运行，带来较大的振动，甚至可能导致组件永久性的磨损和扭裂。当转轴把能量从叶片和转子传送到齿轮箱时，它的转动轨迹必须是一个标准的圆形。如果转子和齿轮箱之间的转轴，或者齿轮箱与发电机之间的转轴失去对中，它会以一个椭圆形方式旋转，导致传动链振动。当能量从组件的一个地方传输到另一个地方时，这种错位被逐渐放大。安装系统时，在叶片高速运转之前必须对转轴进行严格的对中调试。

实际中采用一些特殊的装置来确保传动链的正确安装，或者来测量转轴重量失衡引起的振动程度。振动分析用于尽快确定振动源和振动程度，调整转轴实现对中，或者在转轴重量失衡的特殊点增加重量来消除不平衡。在一些系统中安装振动检测器是为了及时检测出有害的转轴振动成分，在其他系统中，需要对运行一定时数的系统进行定期有计划的振动检查。传动链同轴度必须定期检查，以确保将低速轴、齿轮箱和高速轴之间的振动控制在最低限度。

图 7-39 是一个为了方便对转轴、齿轮箱和发电机进行检查的舱盖敞开的风力机机舱。图 7-40 展示了技术人员在安装到机舱内的传动链上工作的情况，包括转轴、齿轮箱和发电机。风力机可能需要移动或更换齿轮箱或者发电机，这些工作必须在打开的机舱内进行。

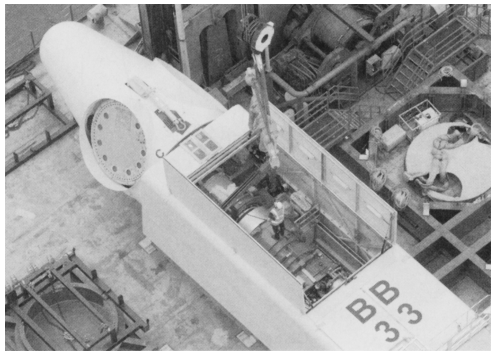


图 7-39　敞开舱盖的风力机机舱
（图片来源：Siemens Wind Energy）

图 7-40　安装到机舱中的风力机驱动链（图片来源：Nordex）

7.9　直驱系统

一些风力机不是通过齿轮箱改变向发电机传递能量的转轴的转速，这种风力机中的发电机直接和转子叶片相连，称为直驱型风力机。直驱风电机组不使用任何齿轮，风力机叶片转动速度就等于发电机转速。这意味着因风速不断变化而引起的叶片转速不断改变，将使直驱风电机组的输出电压频率也不断变化，必须经过电力变换器将发电机发出的交流电变成 60Hz 恒定频率的交流电。这种类型的风力机实际上比使用齿轮箱的机型更加高效，它的重要部分是电力电子变换器，其容量大小必须与需要处理的电力功率相当。该系统的优点是少了一个需要定期维护的机械部件——齿轮箱，图 7-41 为一个直驱风力机的照片。

由于直接驱动装置不需要齿轮箱，这样发电机就可以使用节省的空间。从发电机出来的电缆直接连接到地面，变换器或储能设备安装在地面上。这种设计可使安装在空中的装置尽量少，特别是安装在维护困难的塔架顶部。

图 7-42 是直驱式风力机的分解图，从图中可以看到转子直接连接到发电机转轴上，机舱显得非常紧凑而且比较轻。这种直接驱动系统的主要问题是发电机的转速变化范围很大，因为风速在 10 ~ 50mile/h 的大范围内变化。

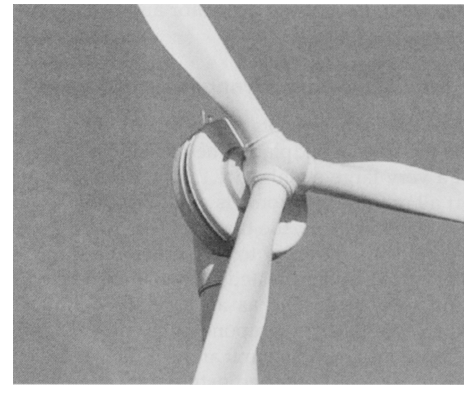


图 7-41　直驱风力机
（图片来源：EWT International）

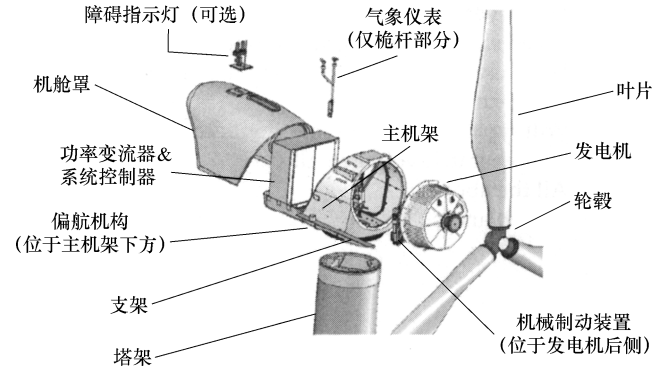


图 7-42 直驱风力机分解图（图片来源：Northern Power System Inc.）

简 答 题

1. 简要阐述轴承的作用和工作原理。
2. 驱动齿轮有 20 个齿，从动齿轮有 80 个齿，这个齿轮装置的传动比是多少？
3. 解释风力机中齿轮箱的工作原理。
4. 说明为什么风力机需要齿轮箱。
5. 解释直驱风力机如何发出 60Hz 的交流电。
6. 列出五种不同的齿轮，并分别解释它们的作用。
7. 齿轮箱中采用行星齿轮的优点是什么？
8. 列出偏航系统中使用的齿轮类型。
9. 解释轴台的作用。
10. 解释发电机为什么需要保持一个相对恒定的转速。

选 择 题

1. 风力机需要齿轮箱是因为（ ）。

a. 风力机叶片的转速和发电机转速一致，需要用齿轮箱来存储多余的能量

b. 风力机叶片的转速相对较高，而发电机的转速相对较低，需要用齿轮箱进行匹配

c. 风力机叶片的转速相对较低，而发电机的转速相对较高，需要用齿轮箱进行匹配

d. 齿轮箱可以使发电机以任意转速旋转

2. 驱动齿轮有 10 个齿，从动齿轮有 50 个齿，这个齿轮系列的传动比是（ ）。

a. 2∶1

b. 3∶1

c. 5∶1

d. 1∶5

3. 驱动齿轮有 5 个齿，从动齿轮有 40 个齿，当驱动轮的转速为 800r/min 时，从动轮的转速是（　　）。

a. 10r/min

b. 20r/min

c. 100r/min

d. 1600r/min

4. 齿轮箱采用行星齿轮时，（　　）。

a. 内部的齿轮叫作环形齿轮，外部齿轮叫作太阳齿轮

b. 内部的齿轮叫作太阳齿轮，外部齿轮叫作环形齿轮

c. 行星齿轮的输入和输出转轴成 90°

d. 以上所有

5. 风力机的传动链（　　）。

a. 由风力机叶片、转子、低速轴、齿轮箱、高速轴和发电机组成

b. 是独立安装在机舱内部底板上的元件

c. 把风力机叶片上的能量传送给发电机

d. 以上所有

e. 只有 a 和 c

6. 高速轴（　　）。

a. 连接风力机叶片和齿轮箱

b. 连接齿轮箱和发电机

c. 直接和低速轴连接

d. 以上所有

7. 轴承（　　）。

a. 安装在齿轮和转轴之间，保证它们正确工作

b. 使运动部件之间的摩擦力最小

c. 转轴旋转时限制振动

d. 以上所有

e. 只有 a 和 b

8. 轴台（　　）。

a. 用来固定或支撑轴承

b. 确保轴呈直线对中，减小振动

c. 作为一个整体或部分单元

d. 以上所有

e. 只有 a 和 c

9. 直驱风力机（　　）。

a. 用一个很大的机舱安装高速轴、低速轴、齿轮和发电机

b. 发电机随着风力机叶片同速旋转

c. 由于发电机发出的频率是时变的，因此需要一个变频器

d. 以上所有

e. 只有 b 和 c

10. 驱动链对中是指（　　）。

a. 驱动系链所有元件分布呈直线

b. 转轴是把风力机叶片的能量传输给发电机，它的振动要限制在尽可能小的范围内

c. 定期检查，确保所有元件在一条直线上

d. 以上所有

e. 只有 a 和 c

第 8 章　电网与风电并网

本章学习目标

读完了本章你将能够：

- 认识电网的三个主要部分。
- 解释电网的概念及其如何将电能分配给用户。
- 解释智能电网的概念及其与普通电网的区别。
- 解释变压器的工作原理。
- 认识变压器的两个绕组。
- 认识规定电力公司从风电场购买电能的联邦法规，并明确这些法规颁布的时间。
- 解释变电站的概念及它对电网的重要性。
- 认识 IEEE 1547-2003 标准对并网电能的技术要求。
- 解释电能表的作用。
- 解释电能质量问题。

本章关键词

视在功率（Apparent power）
欠电压（Brownout）
容性负荷（Capacitive load）
闪变功率（Flicker power）
电网（Grid）
电网公司［Grid companies（Gridco′s）］
接地（Grounding）
感应电流（Induced current）
感应（Induction）
感性负荷（Inductive load）
电气与电子工程师协会［Institute of Electrical and Electronics Engineers（IEEE）］
千伏安［Kilovolt-ampere（kV·A）］
低电压穿越［Low-voltage ride-through（LVRT）］
美国国家电气规范［National Electrical Code（NEC）］
电能表（Net meter）
功率因数（Power factor）
电能质量（Power quality）
一次线圈（Primary winding）
公用事业管制政策［Public Utility Regulatory Policies（PURPA）］
无功功率（Reactive load）
电阻性负荷（Resistive load）
二次线圈（Secondary winding）
架空引入线（Service drop）
智能电网（Smart grid）
降压变压器（Step-down transformer）
升压变压器（Step-up transformer）
变电站（Substation）
变压器（Transformer）
输电公司［Transmission companies（Transco′s）］

有效功率（True power）　　伏安［Volt-ampere（V·A）］
电压比（Turn ratios）

本章概述

本章将讨论风电并网的相关内容。工作领域涉及风力机电气部分、电网和电力线路的人员，除了要学习电力工作的相关知识外，还要接受特殊的培训，以便能够在200V以上的电压环境中工作。工作人员靠近高压时，需要穿上特殊的工作人员保护装备（PPE）。工作人员在危险的闪光电弧中工作，也需要经过特殊的培训并用特殊装备来保护自己，抵御闪光电弧。闪光电弧是从开关柜或其他电气终端发射出来的一种电弧，这种电弧可能会引起严重火灾，在工作人员没有保护装备的情况下也可能造成严重的烧伤和电击。电力公司每天从事高压工作的人员，多年来正是采用保护装备来保证他们的人身安全。此章还将清楚地讲述电网的概念以及风力机的并网方式。

本章首先讲述了当前电网的规模及其潜在的发展前景，讨论了新兴的智能电网的相关内容及特征，分析了美国国家电气规范（NEC）和关于电网的其他规范，阐述了它们之间的区别。

本章还讲述了由风力机发出的电能直接给商业大厦或居民供电的方法，以及基本的电能计量方法。此外，本章还讲述了电网中实现电力分配的开关和连接技术。除此之外，本章还介绍了风力发电机输出电能经过滤波后同电网电压和频率相匹配的方法：可以通过控制风力发电机和风轮的速度实现发电机电压与电网电压同频，也可以通过电力变流器等设备来实现二者同频。本章还介绍了一些关于电压控制和无功功率控制的方法。除了风力发电机并网相关问题以外，本章还讨论了电能质量问题和风力发电机保护电路，例如闪变引起的电能质量、低电压穿越保护等。

最后，本章还介绍风力发电系统的接地问题，以及来自发电机的电能同变电站或现场电源相连的问题。内容包括地下电缆和架空线路的选择、采用变压器的原因。作为大型风电场一部分的风力机，它将与风电场的变电站相连，其具体内容将在本章最后进行讨论。

8.1 了解电网

本节首先复习一下第1章提到过的电网的相关知识。本文的电网是指包括美国和北美洲其他地方的全部电力输配系统。若把风力机设计成并网型风力发电系统，则它必须同现有电网中的一部分相连，并且风力发电机输出的电能也必须满足该区域电网的特定要求。电网用来给全美国输送、分配电能，它由很长的相互连接的电力线路构成，这些电力线路负责将电能从发出的地方输送到消耗的地方。发电机发出的电压不足5000V，这个电压经过升压变压器升高到545～765kV用于长距离输

送，或者升高到 345 ~ 545kV 用于短距离输送。电能输送到负荷端后，通过位于城市或工业区域附近的变电站降压，降为 12470V 左右的低压后分配到周围的城镇或电能消耗终端。户外电力塔杆上的变压器或工业应用的小型变电站可以再次将 12470V 电压降低为 120V 的民用电压和 240V 或 480V 的工业电压。图 8-1 显示了从发电厂经过输电力线路到居民用户的电能输配系统。

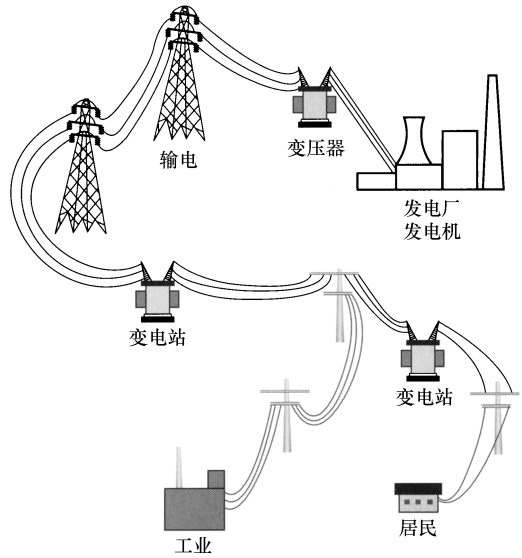


图 8-1　从发电厂到用户的电能输配系统

电网包括发电站、输电系统、中压输电系统、变电站、馈线、服务系统和用户。发电厂包括火力发电厂、核电厂、水电厂、风力发电场和光伏发电站（太阳能发电站）。输电线路和中压输电线路包括在全国范围内远距离输送电能的高压和超高压输电线路。变电站是指坐落在城市边缘和商业区附近的一套大规模变压器组及其附属设备，它可以把发电厂输送来的高电压等级的电能变换为低压电能。馈线的功能是为城市和居民区提供或配送电能。服务系统包括为工业、商业和居民提供电力接入的变压器和电力线路。电网用户是指所有的用电客户或电气设备，例如大型的工厂。

本书第 1 章介绍了如图 8-2 所示的电网，该电网以地图的形式表示。从图中可以看出各个州的电网之间的连接关系。美国电网分成三个主要部分：东部互联电网（the Eastern Interconnect）、西部互联电网（the Western Interconnect）和德克萨斯州互联电网（the Texas Interconnect）。东部互联电网进一步分为：东北区电力协调委员会（NPCC），包括缅因州（Maine）、佛蒙特州（Vermont）、新罕布什尔州（New Hampshire）、纽约州（New York）、马萨诸塞州（Massachusetts）和罗得岛州（Rhode Island）；大西洋中部地区理事会（MAAC），包括马里兰州（Maryland）、特拉华州（Delaware）、新泽西州（New Jersey）和宾夕法尼亚州（Pennsylvania）

的一部分；东部中区可靠性协调组织（ECAR），包括密歇根州（Michigan）、印第安纳州（Indiana）、俄亥俄州（Ohio）、西弗吉尼亚州（West Virginia）和肯塔基州（Kentucky）；东南部电力可靠性委员会（SERC），包括除佛罗里达州外的南部各州；佛罗里达系统协调委员会（FRCC），包括佛罗里达州的全部；中部美国互联电力系统（MAIN），包括威斯康星州（Wisconsin）和伊利诺斯州（Illinois）；中部大陆地区联合电力系统（MAPP），包括达科他州（Dakotas）、内布拉斯加州（Nebraska）、明尼苏达州（Minnesota）和爱荷华州（Iowa）；以及西南联合电力系统（SPP），包括堪萨斯州（Kansas）和俄克拉荷马州（Oklahoma）。德克萨斯州互联电网包括德克萨斯州电气可靠理事会（ERCOT），包括德克萨斯州的全部。西部互联电网包括西部系统协调委员会（WSCC），包括新墨西哥州（New Mexico）、科罗拉多州（Colorado）、怀俄明州（Wyoming）和蒙达拿州（Montana）等西部各州。

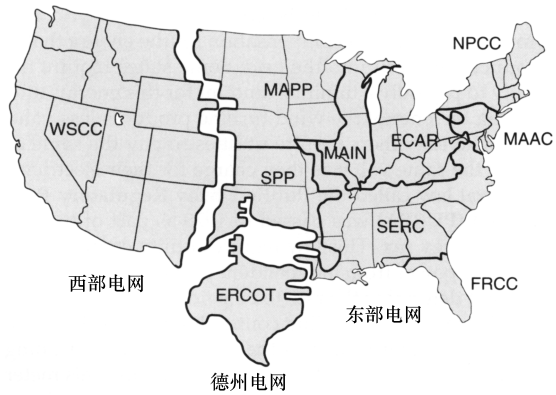


图 8-2 美国东部互联电网、西部互联电网和德克萨斯州互联电网分布图
（图片来源：美国能源信息管理局）

表 8-1 列出了 2009 年美国的用电量、供电量和容量裕度。容量裕度指供电量比用电量多出的电量。为了满足潜在的工业和居民需求，一定要保证可用电量大于消费电量。2009 年东部互联电网的容量裕度是 19.3%，德克萨斯州互联电网为 13.6%，西部互联电网为 22.0%。整个美国的平均容量裕度为 19.4%。了解各部分电网需要多少电量，实际中又有多少可用电量是很重要的，因为这些决定了电网每天每小时必须发出的电量。风力机和其他替代电源要代替传统的电源，就必须能够按照需求发出一定的电能。目前，由风电和其他替代能源发出的电能只占巨大负荷的一小部分。

表 8-1 2009 年美国的用电量、供电量和容量裕度

	东部电网	德克萨斯州电网	西部电网	整个美国
负荷/MW	554412	63376	136441	754229
供应/MW	688783	72204	174978	935965
容量裕度(%)	19.3	13.6	22	19.4

电网为图 8-2 中的各个地区供电，若这些电能由风力机提供，则必须明确风力发电机的并网位置，熟悉此处电网的特定要求，并获得风电并网的许可文件。

一般地，术语中所说的电网是指系统中传输和分配电能的部分，其涉及的范围从电能发出的地方，如一台风力机或一个风电场，一直延伸到电能消耗的地方，如工业、商业或居民等地区。有时，本文中“电网”也用来指为美国或北美洲某个地区供电的地区电网。输电线、杆塔、变压器和开关设备属于被称为输电公司（Transco′s）的独立公司所拥有。管理电能交换和输配等电网功能，防止由于电能短缺而可能引起某地区限电或停电的公司称为电网公司（Gridco′s）。部分电网设备或电网功能也可能由区域电力公司或地区电网公司拥有或负责。

通过电网设备的电能可以当作商品，通过长期或短期合同进行交易。电网设备的部分所有权和流过电力线路的电能的销售权由电力设备所在的州和电能消耗州来规定。部分电网在两个或多个州之间传输电能，此部分电网也由这些州共同管理，这也解释了了解风力发电系统并网位置以及并网地区法律、法规的重要性。例如，一些州要求电网公司和传输电能的输电公司购买由风力机发出的电能，而在另一些州，风力机业主和电网公司之间则没有合作机会。在大多数地区，风力机并网并向电网输出电能都需要申请，并根据风力机发出电能获得利润。

电网中，远距离输电主要分为 4 个电压等级。在美国电网中，传输电能的最高电压是 765000V，大型水力发电站输出电能需要更高电压等级的高压输电线路传输。此外，还有 500000V、345000V 或 230000V 电压等级的输电线路。一般电压等级越高，电能传输的距离也越远。

美国电网分为三个主要部分：东部互联电网、西部互联电网和德克萨斯州互联电网。这三部分是相互独立的，一个系统出现问题不会影响其他两个系统。每个地区都有许多大型控制中心，通过不断监控电网确保其有充足的可用电能。即便必须限电，也可以控制在尽量小的范围内。本章后面还将讨论当今电网存在的优点和缺点，并进一步介绍电网从普通电网升级到所谓的“智能电网”的过程。

本章简单介绍了电网的概念及其功能后，将重点介绍风力发电机并网的相关知识。目前美国大约 42 个州制定了相关法规，许可或要求电网公司允许风力发电机或其他发电设备发出的电能输入电网，并且能为输送至电网的电能提供一些类型的补偿。一些州要求电网公司以较便宜的价格购买这些电能，从而导致风电的价格很低；然而在另外一些州，风力机发出的电能和利用其他能源发出的电能价格相同或相差不多。1978 年通过的被称为公用事业管制政策（PURPA）的联邦法规是国家能源法规的一部分，此法规要求电网公司购买由独立供应商发出的电能，但该法规并未规定购买电能的价格比率。

用电能计量装置来测量流入和流出电网的电能是风电并网的一种手段。由于这种电表可以测量风力机发出和消耗的电能，因此称它为电能表。有些电能表允许发出的过剩电能存入或计入用户的账号，这就意味着用电的价格可以等于发电的成

本。电能表允许电能的正、反向计量，这使得发出电能和消耗电能的计量变得非常简单。

8.2 智能电网

智能电网实质上是现有电网的升级。当前，电网中的信息和能量只能向一个方向流动——从电能发出的地方流向电能消耗的地方。发出电能的电力公司或风力发电机为电网提供电能，这些电能连同其他电流能量通过电网流向负荷终端。目前发（供）电方正常运行所需要的数据和信息只能向一个方向流动——从电能输出方流向电能消费方或用户。

智能电网是基于电网信息双向流动的概念而提出的。比如，当地的居民和商业电能表可以记录当时或不同时期当地电能消耗的详细信息并发送给发电公司或输电公司。该信息的重要作用是，记录并分析这些数据便可预测未来所消耗的电能。该电表还可以将每时每刻用户所消费电能的价格，以及不同时刻电价的走势等额外的信息显示给用户。比如在深夜，电网中有过量的电能可用，这时称为低峰期或非高峰期，若用户此时用电，发电公司可以提供相对便宜的电能。在非高峰期加热炉内的水或其他传热材料，便可为用户节省相当数量的电费支出。

智能电网能区分电网输电过程中的每一个阶段和辨识每个有计算机网络地址的终端用户。这些地址允许当地的所有用电设备发出和接收用电数据，这些数据包括用户所用电量、日期时间以及其他信息，如温度和其他环境条件。由于电网中的所有节点都有自己的特定地址，这样就构成了一个巨大的计算机网络，在此网络中信息可以流入或流出每个节点。网络中的信息可以通过一个小显示屏，或者居民用户和商业用户的计算机显示，来帮助消费者了解在任意时间内所消耗的电能，以及是否在晚些时候有选择的余地或者是否价格可以更便宜。如果家里有一个可以随时充电的电动车，智能电网能够提示充电最便宜的时刻。

智能电网能够监控网络中所有终端用户内可控的电能表和开关设备。比如，家里的所有负荷都可以与一个控制器连接，该控制器可分别监控每一个负荷，可以在短时内通断负荷以避开用电高峰期。上述控制器可以给空调系统、电热水器、电干衣器和电灶发出或接收控制信号。智能电网能通过监测这些用电设备来明确它们的使用频率及使用时间。电力公司就可以为用户提供几个与电网用电高峰时期相适应的资费套餐。电力公司可以使电价在高峰时最贵，在低谷时最便宜。非高峰期内的电能比较便宜是因为此时发出的可用电能比消耗的电能多，这通常发生在深夜，因为用户都在睡觉，而且夜间使用大量电能的工厂和商业组织很少。用户可以在这个时段使用一些用电设备，如加热热水、给电动汽车充电或加热电炉，以保证这些负荷在电价最低的时候用电。智能电网的此种功能可以帮助用户的用电行为更好地与发电方的发电量相匹配。

如今，发电公司通过预测给定时期的负荷量，来消耗一定数量的煤或核原料等能源，以发出在未来几个小时内被消耗的电能。因为电能由发出到消耗的过程有延时，若未来几小时内的电能未被消耗，一些电能便会被浪费。由于目前的系统没有实现实时监测，用电模式以及由天气或其他外部条件变化而导致的负荷变化情况的预测效率是很低的。

带有居民和商业控制器的智能电网可以使终端用户按照与电力公司签订的协议，在电网过负荷或者欠电压时将最大的负荷暂时切掉或关停。欠电压是指在电网中用电量大于发电量时，系统会发生低电压状态，此时电压会下降 10% ~20%。如果欠电压状态持续时间很长，会使带有电动机的大型用电负荷（如空调器压缩机和水泵等）严重损坏或迅速升温。改善欠电压状况的方法是让电网的配电控制系统切掉大型负荷及用电量多的用户，直到电压恢复正常。在智能电网中，大型工业用户与电网公司达成协议后，为了降低电价允许大型电气设备短时从电网脱开。该方法已对大型工业用户应用了将近十年，随着智能电网的发展，这种价格管理方式也将应用于居民用户。比如，如果居民用户同意在高峰期或欠电压状态发生时将空调器关掉，电网公司将会同意给这些用户提供比较便宜的电价。

智能电网还可以通过控制器切除一些特定负荷，根据电力负荷情况只允许在一天或一周的低峰期为该负荷供电。

智能电网由一个计算机网络发出和接收信息，因此它需要通过现存的计算机网络与用户相连，或者将信号以数据报的形式在高压电力线路上传输，然后由计算机通信设备和网络设备从单相或三相高压线路中过滤出这些信号。因此，计算机数据可通过高压电力线路发送和接收。

在输电方面，智能电网能确定国家的哪个地区以及电网的哪个部分使用的电能最多。这有助于实现将电能重新分配到当时最需要的地方，并且还可以帮助互联系统迅速识别故障并尽快隔离和断开最小的故障区域，以确保故障不会影响整个电网。回顾一下 2003 年 8 月的停电事故，当时闪电袭击了俄亥俄州克利夫兰地区的一条电力线路，随后的联锁事故导致了俄亥俄州、宾夕法尼亚州、纽约州、密歇根州以及加拿大安大略省等地区的大规模停电。停电事故发生的原因是电网不能迅速地切断故障电网，没能及时阻止停电事故在多个州和地区之间的蔓延。智能电网所采用的新型技术和设备能够把停电范围限制在一个尽量小的区域内，也许会限制在闪电发生的地区内，而不让它在各地区之间蔓延。

如今电网所面临的另一个问题是传输效率不高。一些专家认为，如今电网中多达 30% 的电能会因电能的低效传输而损失掉，或者由于电力线路太旧而以热能形式损失，或是由于设备陈旧或连接不可靠而造成损耗。智能电网可以提供发电环节与用电环节之间最高效的电能传输方案。

目前风力机使用可编程序控制器（PLC）或计算机控制，因此其同智能电网的连接很容易实现。通过实时测量风力机所发出的电压或电流，可以计量任何时间内

风力机送入电网的可用电量。

在美国，一些大型能源公司如通用电气（GE）、IBM 和西门子电气都致力于智能电网的关键技术研究，以便尽快实现智能电网建设。智能电网建设所面临的主要问题之一是，将居民和商业用户转移到新设备，以及改变传输设备和开关设备需要巨额的成本和花销。当前智能电网正处于建设阶段，这个过程会持续多年。许多专家认为智能电网的建设和互联阶段类似于当年电能最初引入美国各区的阶段，当时也是经历了多年才将电能输送到美国的各个地区。

8.3 变压器及输配电基本设备

为了更好地理解电能的传输和分配基本设备，首先介绍一下变压器以及构成变电站的变压器组的原理和概念。变压器是可以将交流电能从一个电压水平变换到另一个电压水平的电气元件，如将交流电压从 900V 变换到 12470V。变压器由位于金属外壳内的两套彼此相邻的线圈绕组构成，绕组内放有铁心，但两个绕组之间没有直接电气连接。这两个绕组分别被称为一次绕组和二次绕组，交流电压施加到一次绕组后，将会在二次绕组感应出电压。施加到一次绕组的为交流电压，它是典型的正弦波——开始于零并增长到正峰值，随后返回到零值，然后继续降至负峰值，最后再返回到零值。每一次电压从零上升到峰值的时候，它将会在一次线圈中产生电流，该电流在一次线圈周围感应出很强的磁场。当电压从峰值下降到零值的时候，磁场和磁通量就会随之下降并且磁场中的磁通量切割所有绕组的导线。只要磁力线切割绕组中的导线，就会在二次绕组中感应出电流。这意味着，每次变压器的一次绕组被施加交流电压，随着该电压波形上升到正峰值并返回到零点，然后下降到负峰值再到零点，变压器二次绕组就可以感应类似的交流电压波形。二次绕组电压的相位不同于一次绕组电压的相位，两者相差 180°㊀。因为一、二次绕组之间没有直接的电气连接，所以二次绕组感应出来的电压是由一次绕组的电压产生的磁力线和磁场变化时切割二次绕组产生的。

二次绕组感应出的电压幅值是由一次绕组和二次绕组之间的匝数比决定的。若二次绕组是一次绕组匝数的两倍，则二次电压为一次电压的两倍，而二次电流则为一次电流的 1/2。流经变压器的电功率用伏安（V · A）表示，其数量通常能达到千伏安（kV · A）。若已知一台容量为 10kV · A 的变压器的电压，便可通过将功率除以电压得到电流的数值。

二次电压比一次电压高的变压器称为升压变压器，二次电压比一次电压低的变压器称为降压变压器。当在一个社区附近大量的变压器被共同采用时，就构成了变电站。

㊀ 一、二次绕组电压的相位差取决于电路计算的规定正向压，可以是 0°，也可以是 180°。——编辑注

8.3.1　变压器概述

变压器用于升高和降低电压等级。发电厂发出的电压，要通过变压器被升高到几千伏甚至几万伏，以降低电能传输时的电流。输电线路中的电流减小时，可减小电力线路的尺寸和重量，从而采用小型的输电塔杆即可满足要求。升至几千伏的电能被送入电网，会经过数百公里的距离输送到消耗电能的城市。此后高压电能需要降到适合的 12470V 电压，使得在城市内传输时减少危险性，该电压适合在城市内传输。当被输送到一个工厂时，该电压要进一步降低到 480V、240V 或 208V、120V 以适应厂内的所有电力线路，包括办公室。居民区的电压，线电压为 240V，相电压为 120V。变压器为电压变换提供了一种理想的手段。

8.3.2　变压器运行及基本磁理论

变压器由两套绕在一个叠层铁心上的绕组（线圈）组成。施加电压的变压器绕组为一次绕组，输出电压的变压器绕组为二次绕组。图 8-3 是一台带有一、二次绕组的典型变压器电路图。

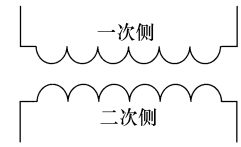


图 8-3　变压器的一、二次绕组

变压器的工作原理是电磁感应理论。电流流过一次绕组时发生电磁感应，电流感应出磁场，即一次绕组中有电流流过时，感应的磁场产生穿过绕组的磁力线。当绕组中的电流中断或停止时磁力线会消失，随着电流变化的磁力线会切割与一次绕组毗邻的二次绕组。正如前面所述，交流正弦波开始于 0V，随后上升到峰值，然后返回到零值再从相反方向重复波形。电流通过电力线路时，在其上升到峰值再回到零点的变化过程中产生了变化的磁力线，电流过零点时，磁力线消失。因为交流电压以每秒 60 次循环的频率按正弦波规律变化，这是一种非常适合变压器运行的电压波形。

当每半个周期交流电压过零时，一次绕组产生的磁力线开始减少并切割变压器的二次绕组。当一次绕组中的磁力线切割二次绕组中的线圈时，二次绕组中的电子开始移动并形成电流。由于变压器的二次绕组与一次绕组无任何电气连接，因此二次电流被称为感应电流。

下面给出关于交流电压和变压器两套绕组之间关系的更详细的技术解释。当给变压器一次绕组施加电压后，在正弦波的第一个半周期（0° ~ 180°）内，变压器一次绕组中就会逐渐建立起磁场。正弦电压在 90°时达到峰值，电压达到正的最大值，随后随着相位从 90°移动到 180°，电压返回到 0V。当正弦波电压变化时，一次绕组产生的磁力线也随之变化并切割二次绕组，这样就在变压器二次侧感应出了电流。

在正弦波的负半周期，相位在 180° ~ 360°之间连续变化，变压器一次绕组承受正弦波的负半周期电压。正弦波在 180° ~ 270°之间变化时会再次产生磁力线，当正弦波达到 360°时电压返回到 0V。这就意味着变压器的一次绕组施加电压后感应出磁场，并且在每个正弦波的正半周期和负半周期内分别使磁场消失一次。变压

器二次侧的电压是被感应出来的，因此被称为感应电压。

尽管变压器的一、二次绕组之间没有电气连接，但二次侧仍然会产生感应电压。图 8-4 显示了变压器中感应电压产生的 4 个阶段以及 4 个阶段的磁力线建立和衰减的变化情况。

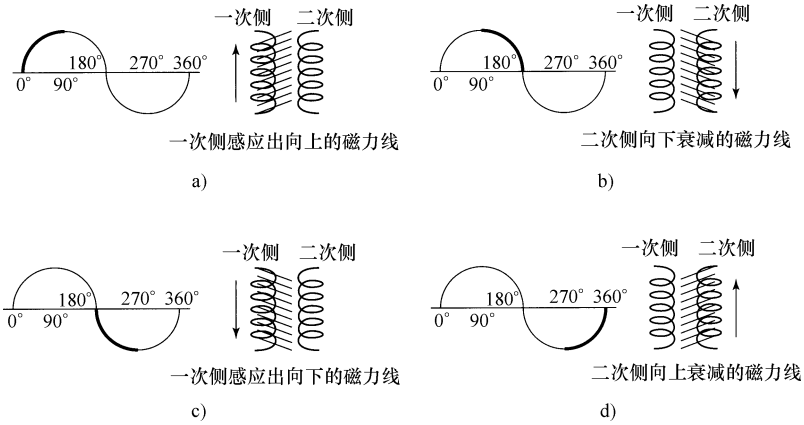


图 8-4　a）一次侧感应出向上的磁力线　b）二次侧向下衰减的磁力线
c）一次侧感应出向下的磁力线　d）二次侧向上衰减的磁力线

8.3.3　变压器的电压、电流和电压比

当给定变压器一次侧施加电压后，变压器感应出的二次电压取决于一次绕组与二次绕组之间的线圈匝数比，该匝数比称为电压比（变比）。变压器中一次电流和二次电流之间的关系也取决于电压比。

图 8-5 显示了变压器的一次电压（E_p），一次电流（I_p），一次绕组匝数（T_p），二次电压（E_s），二次电流（I_s），二次绕组匝数（T_s）。变压器一、二次侧的电压和电流以及电压比均可以从公式中计算出来。变压器的电压比可以用下式计算：

$$\text{电压比} = \frac{T_s}{T_p} 或 \frac{V_s}{V_p} 或 \frac{I_p}{I_s}$$

一、二次电压之比与一、二次绕组匝数比的关系为

$$\frac{E_p}{E_s} = \frac{T_p}{T_s}$$

利用电压比可从下式计算二次电压

$$E_s = \frac{E_p T_s}{T_p}$$

一、二次电压和电流的比值关系为

$$\frac{E_p}{E_s} = \frac{I_s}{I_p}$$

（注意：电压比值是电流比值的倒数）。用此比值

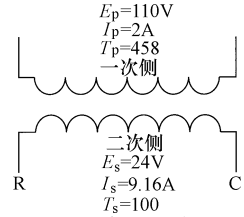


图 8-5　一次电压为 110V，二次电压为 24V 的变压器

还可以计算二次电流：

$$I_s = \frac{I_p E_p}{E_s}$$

如果已知一次绕组电压为 240V，电流为 2A，线圈匝数为 458 匝，二次绕组线圈匝数是 229 匝，二次电压和电流便可以很容易地用下式计算得到：

$$E_s = \frac{E_p T_s}{T_p}$$

$$\frac{240\text{V} \times 229\text{turns}}{458\text{turns}} = 120\text{V}$$

$$I_s = \frac{I_p E_p}{E_s}$$

$$\frac{240\text{V} \times 2\text{A}}{120\text{V}} = 4\text{A}$$

8.3.4　升压变压器和降压变压器

如果二次电压比一次电压高，则此变压器为升压变压器；如果二次电压比一次电压低，则此变压器为降压变压器。一般大中型风力发电机发出的电压约为 900V，用升压变压器将电压升高到 12470V 以达到并网电压等级。当电能被输送到用电地区的变电站时，输电电压通过降压变压器降到 480V 的厂用电压，或降到 240V 的民用电压。

8.3.5　变压器容量

变压器的容量（伏安或 V・A）可以由变压器的一次侧计算，也可以由变压器的二次侧计算。变压器容量的计算可以用一次（额定）电压电流的乘积也可以用二次（额定）电压电流的乘积。如果一次电压是 240V，电流是 4A，则变压器容量为 960V・A。变压器的容量表明变压器所能够提供和处理电能的多少。作为一般的技术人员，可以认为一、二次功率相等而不必考虑变压器损耗。而作为设计工程师则要求考虑更细致，由于损耗的存在，变压器二次功率略小于一次功率。值得注意的是变压器的额定功率要比实际功率大，如果变压器的额定功率太小，实际运行时较大的电流会使它过热，变压器会被毁坏并退出运行。如果要换掉一台变压器，首先必须保证新变压器电压比匹配，另外新变压器的容量要等于或大于原变压器的容量。

当功率为 1.8MW 的风力机发出的电能经变压器传输时，升压变压器二次电压将达到 12470V，电流也高达 140A，变压器的容量也必须设计在 1800kV・A 左右。

8.3.6　变压器的故障诊断

在超过 200V 的变压器周围工作的人员，要接受特殊的训练并穿上特殊的个人保护装备。高压会产生有害的闪光电弧，如果在电能接通、断开或其他情况下发生闪光电弧，则有可能导致人受到伤害甚至死亡。本节将介绍从电路中退出的小型变压器的故障诊断方法，以此为背景可以更好地帮助读者理解典型变压器的工作。如

果要诊断的变压器没有并网运行，则可以先用欧姆表测量每个绕组的完整性。由于导线电阻的存在，每个绕组中的线圈都具有一定的电阻值。如果测得的电阻为无穷大，则表明绕组发生开路，如果检测的绕组电阻为零，则可表明绕组发生短路。

测试小型变压器的另一种方法是为其一次绕组通电。在通电前要首先进行完整性测试，检测是否有短路的情况发生，这是很重要的，如果变压器存在短路，则绝不能通电。另外重要的一点是，当工作于有电压的场合时，一定要透彻地掌握安全原则，并严格遵循这些原则进行测试。如果变压器绕组没有短路，便可以施加等于或小于变压器一次侧额定电压值的交流电压。如果变压器工作或运行正常，变压器二次侧会有感应电压出现。如果在二次侧没有电压出现，需要检查线路以确保接线正确。如果二次侧仍没有电压出现，则说明变压器有问题，应该换掉。一定要牢记，对于变压器相互毗邻的一、二次绕组，当在一个绕组施加交流电压时，在另一个绕组中一定会感应出电压。

8.3.7 城市配电系统的常用电压

一些城市或郊区的配电系统采用变压器实现电压转换，如 7200/12470V、7620/13200V、14400/24940V 和 19920/34500V。为了尽可能地减小输电线路的导线尺寸，电能在城市周围或城市中分配时，需要使用较高的电压。城市中的输配电线路可以采用由传统的电力塔杆和电力线路构成的架空线。而在一些新的工程中，更多地采用由电缆和户内或柜式变电站构成的电能地下输送方式。一般地，农村地区的配电网经常使用架空线和电力塔杆。

8.3.8 城市周围的变电站和配电站

变电站由位于一个为城市供应电能的地点内的一组大型变压器组成。电网的高压电能通过由大型金属塔杆支撑的架空线路实现整个国家范围内的传输。图 8-6 为一系列的高压输电塔杆，电能在这些塔杆上长距离传输并最终输送至变电站。注意图中塔杆的大小以及为了缩短发电厂和配电变电站之间的输电距离而采取的电力塔杆的直线排列方式。

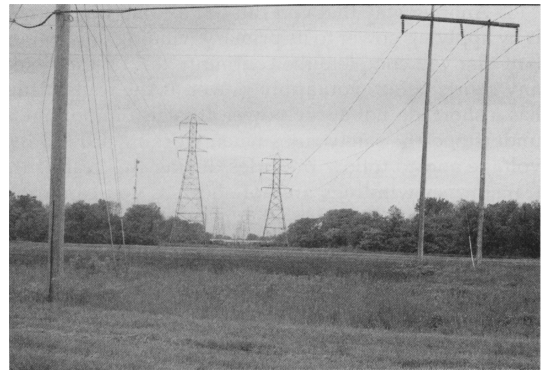


图 8-6 从发电厂到城市郊区变电站之间的高压电力线路

城市郊区变电站内的大型变压器组的输入侧由高压线提供电能。图 8-7 表示了大量安装在地面上的变压器以及用来支撑连接各变压器的电缆的钢架，注意每个钢架的顶部都装有防雷设备。变电站的功能是将高电压和大电流形式的大量电能实现降压并分成小部分，为商业、工业和居民等不同的城市地区供电。

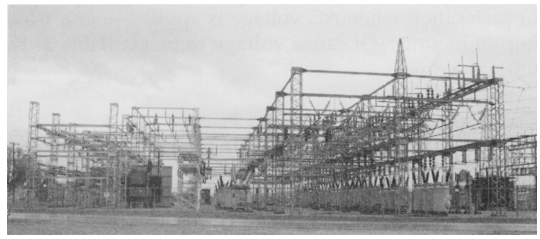


图 8-7　城市郊区的大型变电站，注意，变压器安装在地面上，空中矗立的大型钢架用来分开变压器的馈电线路使其相互之间不会接触

大量的高压电能通过大型变电站降压后被分配到拥有大型工业和大型商业的城市区域，如商业区、大型商店以及居民区。图 8-8 和图 8-9 给出了靠近城市周边的小型变电站的例子，这些变电站紧邻工业区域、商业区域和居民区域。图中还可以看到一辆带着多个移动式变压器的拖车，这些变压器可以接到并网运行变电站的内部。移动式变压器在变压器故障或负荷容量增加时可以快速接入变电站。图 8-10 是一个给小型商业用户提供三相电压的三台变压器，此处的小型商业用户可能只是由位于同一地区的几个商店构成。在一些居民区，一个电力塔杆上就可以安装一台可以为 8 ~ 10 户家庭供电的变压器。而在另一些居民区，电力线被埋在地下，坐落在某一家庭后院的变压器可以为好几个家庭供电。

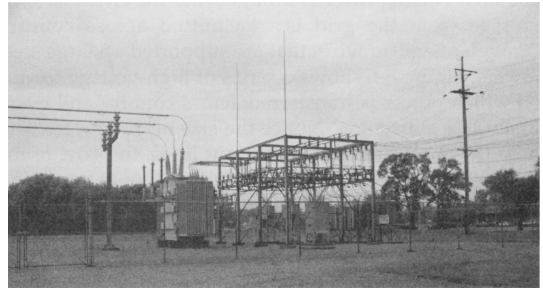


图 8-8　用于小型商业区或小型工业区的变电站

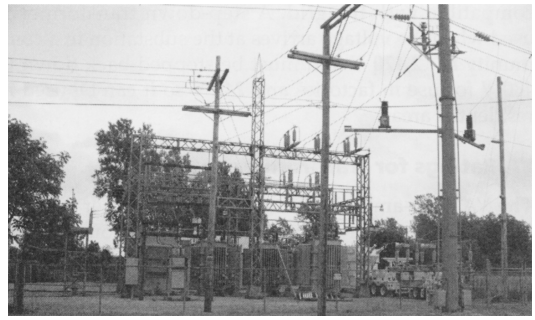


图 8-9　居民区的小型变电站，注意图右边远处拖车上的移动式变压器

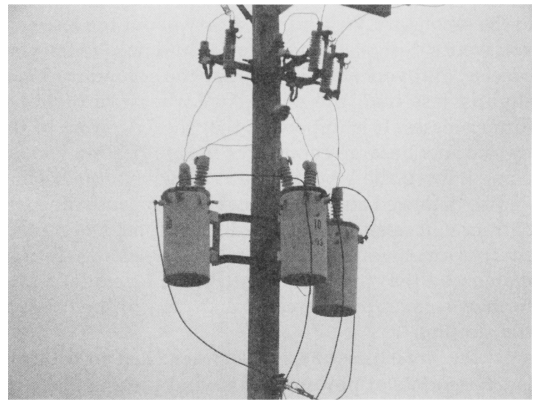


图 8-10 为小型商业区提供三相电压的三台变压器

8.4 并网导则的原则和规范

任何发电装置，如风力机，在并网运行时都符合一定的原则和规范。其中一些原则和规范属于非技术问题，比如风力机业主和地区电网公司之间的并网协议和购电协约；另一部分原则和规范属于技术问题，包括有关安全和电能质量方面，以及其他影响风电并网和脱网的问题。

这些原则和规范是为了解决电气安全和电能质量问题。风电并网的原则和规范主要来自一些发布电网互联导则和标准的安全组织的导则文件，这些安全组织可能包括发布了国家电气规范（NEC）的（美国）国家防火协会（NFPA）、保险商实验室（UL）和电气与电子工程师协会（IEEE）（读作 I triple E）。有两个联邦实验室在导则和设备测试方面同 NFPA、UL、IEEE 以及分布式发电协会保持了紧密的合作，一个是隶属美国能源部可再生能源和能源效率办公室的国家可再生能源实验室（NREL），另一个是 Sandia 国家实验室。这两个实验室不负责导则的编制和执行，但在风电并网方面可以提供有价值的信息来源。技术和安全问题是风电并网原则和规范的一部分，它们可以为保证并网安全提供规范和标准。

8.5 国家电气规范和电网其他要求

国家防火协会（NFRA）编写了国家电气规范（NEC）。最新标准于 2008 年发布，每三年修订一次。NEC 为电力线路制定了特定规范以防止电力线路发生火灾和触电危险。NEC 对载流导体的尺寸、接地及其他安全问题做出了规定。因为风力发电机需要输出电能，所以其接线、并网、安装以及导线截面积等都必须符合 NEC 的要求。其他重要问题，如接地以及在塔架和机舱内线路的敷设，

也都必须满足规范的要求。技术人员可以购买 NEC 手册，以便更好地熟悉和遵循这些标准。

电气与电子工程师协会（IEEE）专门为包括可再生能源（风力）发电系统在内的分布式发电颁布了一个标准，即 IEEE 1547-2003 标准，此标准由 IEEE 和 NREL 合作完成。IEEE 1547-2003 为并网运行的发电设备提供了技术要求和测试标准，而与发电采用的一次能源无关。该标准包括了将分布式能源（DR）接入电网的互联系统和并网测试的要求。风力发电机并网运行时，必须遵循这些标准和规范。颁布及实施这些标准和规范有助于使电源接入电网时更能接近智能电网的新标准。这些标准是专门针对所有分布式电源的，此处的分布式电源是指小容量的分布式发电系统，包括小容量风力发电机㊀。小容量发电机既包括并网运行的风力发电机，也包括不与电网相连而直接为居民或小商业区供电的独立运行风力发电机。

并网技术规范和要求包括：

- 电压调整
- 接入区域电力系统（EPS）及接地技术；
- 同步（保证相位相近）；
- 地区电网中的分布式能源（DR）；
- 区域电力系统的意外带电；
- 监控规定；
- 隔离装置（并网开关设备）；
- 并网完整性。

此外，并网技术规范和要求还包括：

- 区域电力系统的故障；
- 区域电力系统重合闸配合；
- 电压等级；
- 频率；
- 失步；
- 区域电力系统的重新并网。

8.6　建筑供电和居民供电

设计直接为建筑物或居民区供电的风力发电机时，可能也要遵循并网型风力机运行的标准和规则。但是，给建筑物直接供电的风力发电机不需要受电网电压的限制，在建筑设备不受毁坏的前提下，其输出电能的电压和频率允许存在少量偏差。若风力发电机主要用于阻性负荷，如加热和照明，则电压水平和频率控制的要求不

㊀ 原文为“风力发电机”应该为“小容量风力发电机”。——译者注

是很严格。若风力发电机只提供建筑物所需的部分电能而其他电能来自电网，那么所有接线、设备及风力机输出电能都必须满足与风力发电机并网运行时相同的标准。

在一些小规模应用中，以上问题可以通过增加一套包括逆变器和安全开关在内的设备来解决，逆变器用于解决电压和频率问题，安全开关用于解决并网和脱网问题。

8.7 输配电中的开关与并网

风力机发出的电能需要在某一点并入电网，图 8-11 为与电网相连的两台风力发电机的并网点，图中可看到位于电力塔杆顶部的并网和开关设备。电能由地面的风力机提供，并经电力线到达电力塔杆的顶部，图中的导管用于保护电力线路。

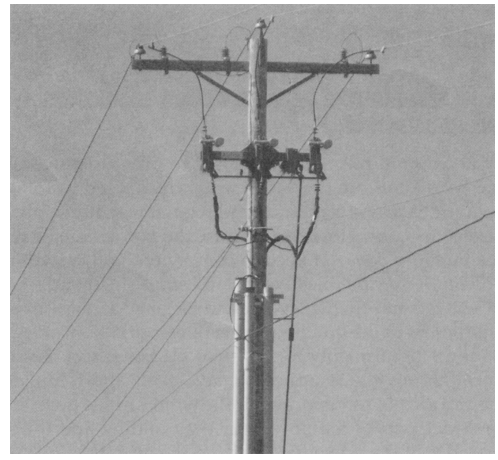


图 8-11 风力机和电网之间的电气连接，并网开关位于电力塔杆顶端附近。

风力机与电网相连时，必须有可靠的安全设备来保护设备免受损害和防止人员受到电击。其中一种主要的设备之一为安全断路开关，它可以在电力故障时自动或手动断开电路来保护电力线路或风力机元件，或者从电网中切除或隔离故障元件来实现对故障元件的保护。安全断路器还在风力机需要维护和维修时确保能快速关停并从电网中断开，使风力发电设备与电网隔离，不再向电网注入功率。当电网需要隔离或停电以进行维护的时候，例如大风、冰雹或飓风使得部分电力输电线受到破坏的情况下，必须采用安全断路开关将风力机切出，防止其继续向电网发电，这是至关重要的。

安全设备还必须包括接地装置，接地装置使用一根直接插入地下约 8ft 的接地棒。在发电系统与大地之间，接地棒提供了一条低电阻路径，以保护发电系统抵御由于雷击或设备故障造成的电流浪涌。接地系统还可以防止风力机周围的金属设备对周围或接触金属外壳的人员造成伤害。如果一条带电导线与没有接地的金属外壳相接触，则该金属外壳就会对人造成严重的电击。如果金属外壳与接地系统相连，只要带电导线与金属接触，接地电流将使导线中的电流迅速上升到熔断器的熔点或电流断路器的动作阈值，从而断开线路。采用这种方式，接地回路可以保证当有不需要或不安全的电压产生时，会形成一个使熔断器或断路器断开的短路条件。

安全装置还有浪涌保护装置，此装置用于保护风力发电设备免受浪涌电流的损

坏。风力机与电网失步时会产生浪涌，此外雷击也会引起浪涌。浪涌保护可以隔离或切断浪涌，或直接将多余的能量引入大地。

风力发电系统必须使用一个开关实现同电网的连接与断开。因维修或其他原因需要风力机从电网断开退出运行时，开关移到断开位置，此时风力机便同电网完全断开。当风力机发出的电能满足当前并网所需的电压水平和频率时，开关闭合，将风力机发出的电能输送到电网。如果风速太低不能维持继续发电时，风力机应从电网退出运行，但此时仍然可以允许风力机空负荷运行。

当风速太小不足以使叶片维持正常发电的转速时，如果仍然将风力机并在电网上，则发电机便会从电网中吸收电能，变为电动机；一旦风速增大，叶片的转速也增大，风力发电机就会重新从电动模式转变为发电模式。

一个必须要监测的重要参数是电压相位，这是因为风力发电机的电压相位同电网电压相位非常接近时才可以进行并网。如果发电机并网时，其电压相位与电网电压的相位相差很大，则会产生很大的并网冲击电流，该电流会损坏发电机。

用于风力发电机并网的开关，与电网中其他用于接通和断开电流回路的开关类似。这些开关已应用多年，经过多年的运行经验和不断改进，大多数开关问题已得到解决，已经具有较好的性能。唯一的问题是，相对于常规大型发电设备如核电和火电，风力发电机输出电压的大小和频率不太稳定，变化范围较大。

短路开关也用于某一部分电网为了进行维护或维修而需要停电和隔离的场合。例如，在冰雹或飓风之后，一些地域范围内的大部分电力线路可能会遭到破坏。此时，被破坏的电网部分需要从其他部分切除，以切断所有的电压，保证工作人员的安全。此种操作叫作电气隔离，所有的发电设备，如风力机，都必须从电网中断开和隔离，以确保其发出的电能不会注入到电网而伤害工作人员。

其他安全设备还包括保障风力发电机顺利穿越电网故障（例如低电压）而不会发生跳闸或其他问题的保护系统。安全设备还可以保护频率越限的问题，例如频率高于或低于标准的 60Hz。

8.8　电力部门的电能计量

在有风力机接入的居民区或商业区，可以用双向电能表来测量风力发电机发出的电能和用户消耗的电能。当风力机不运行时，所有电能都来自于电网，电能表可以检测并记录当时居民用户或商业用户所消耗的电能。这种情况下如同一个没有风力机，只有电网供电的家庭或商业用户一样，用电能表测量所耗电能并为此付费。当风力机开始发电时，居民或商业用户开始使用风力发电机发出的电能，因此电力公司的双向电能表不会记录该部分电能，用户也不必为此付费。如果居民或商业用户所用电量比风力机所发电量少，多余的电能会馈送到电网。双向电能表会反向计量并记录下风力机送入电网的电能。图 8-12 是一个居民用户的电能表。

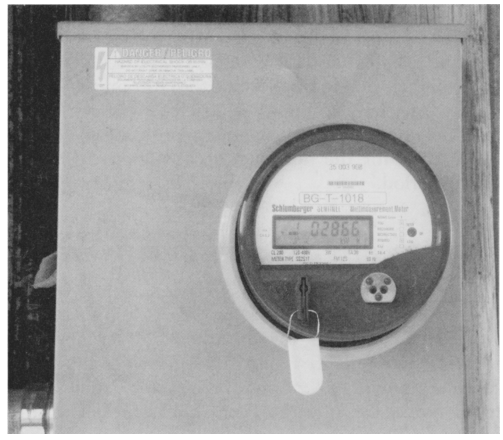


图 8-12　能同时计量由电网提供的电能和
向电网提供的电能的双向电能表

一些电网公司为风力发电机反送到电网的电能提供的支付价格，要比用户购买电力公司电能的价格低。而另外一些电力公司在允许风力发电机向电网发出电能，电能表可以反向计量的同时，还可以提供相同的零售电价。

如果依照现有的联邦法律（PURPA，210 部分），在一些不允许用户向电网反向计量电能的州或地区，用户可以使用风力发电机为他们自身供电，如照明和家用电器。这就抵消了一部分用户需要以零售电价从电力公司购买的部分电量。如果风力机发出多余的电能，也就是说风力机发出电能比消费者消耗的多，此时电能表也不会反转。相反地，电力公司可以按趸售或一个低于零售价的合适价格购买这些多余的电能，多余的电能要用一个独立的表计来测量，而不是用双向电能表。如今有近 30 多个州要求电网公司在他们的管辖权内向小型风电系统提供一些双向电能表，但州与州之间的具体规定和要求差别较大。

在大部分州，双向电能计量的条例是由州公共事业管理部门执行的，并且这些条例的适用范围限制在本地区。在大多数具有双向计量规定的州，所有电力公司都需要为风力机提供双向计量，但一些州在小型风电系统方面的执行力度不够。这些双向电能表或辅助电能表一般是由用户付费安装的。双向电能表使用户在用他们自己发出的电能抵消需要从电网公司购买电能时的计费更为方便。换句话说，用户只需要为他们所消耗的电网电能付费。

8.9　电能质量概述

电能质量指风力发电机或其他发电设备所发电能的电压、电流和频率问题。电能质量还包括正常运行时需要从系统消除的现象，如电磁噪声、直流注入和谐波。

理想的电能质量是指频率为 60Hz 以正弦波形式存在的电压和电流。理想的电压要保持相对稳定，而不是随发电机或电网条件变化而改变。可以用电力电子技术和其他控制来保证风力发电机发出高质量的电能。如果风力机输出的电能有电压或频率问题，要通过检测和检查找出原因，并在风力机接入电网之前解决。

8.10　频率和电压控制

电网中的电压和频率可以由向电网注入大量电能的主要的发电机控制。电网接受大型发电设备发出的电能，如核电发电机组、火力发电机组和水力发电机组，也可以接受风力发电机组及其他替代能源发电设备发出的电能。和风力机相比，大型发电设备更容易实现对电压和频率的控制，因为它们用于发电的能源是连续的，而推动风力机叶片转动的风能则是间断的。

由于来自于大型发电设备的电能的电压和频率是稳定的，因此电网能够承受由风力机对电压和频率产生的一些小的扰动和影响。有很多方法可以控制风力机的电压和频率。众所周知，发电机的转速改变时频率也变化，大型风力机可以采用叶片节距控制和偏航控制，使风轮以恒定速度旋转。大型风力机还可以采用可变速的齿轮，这些变速齿轮可以补偿风速变化，使高速轴的输出转速满足发电机要求，使发电机输出频率维持在 60Hz 附近。

有些采用双馈感应发电机的风力机，利用变流器调节发电机励磁电压，使得发电机在同步转速 5% ~10% 的转速变化范围内输出 60Hz 恒定频率的电能。假设能够产生 60Hz 电压的风速称为标准风速，只要风速在标准风速的范围内，发电机就能够在不同的风速下产生接近 60Hz 的电压。这些发电机发出的频率也许不是严格的 60Hz，但发电机并网后将会被电网强行钳制在 60Hz。只要风力机的并网容量相对于电网不是太大，这种效应就会一直存在。

在中小型风力机中，可以通过采用一台逆变器来产生符合并网条件的电压和频率。此时，为了有效处理发电机发出的电压和电流，逆变器的容量要足够大。除了逆变器外，还需要整流器，其作用是把不同电压和频率的交流电转换成直流电。此外，还需要用电容器和电抗器来滤除来自原始交流电压的纹波。稳定的直流电压最后通过逆变器中的电子器件，如绝缘栅型双极晶体管（IGBT）的开关动作，变换为正弦交流电压。输出电压的频率和大小可以通过控制逆变器中 IGBT 的开关来实现。通过整流器和逆变器，可将发电机输出不稳定的交流电压转换成适于并网的 60Hz 恒频电压，但它们必须要有足够大的容量来控制风力发电机发出的电流和电压。基于这个原因，使用这种类型变流器的风力发电机的容量可能会受到限制。

风力发电机输出电压的调整也有很多方法。首先，发电机的速度不仅能控制电压的频率，还能控制电压的大小。风力发电机转速越快，电压越高。其次，发电机输出电压还受发电机励磁电压的影响，励磁电压越大，发电机发出的电压越高。这

就意味着，如果发电机发出的电压过高，电压调节器可以通过减少励磁电压来降低发电机电压；如果发电机电压过低，则通过增大励磁电压来提升发电机电压。电压调节器能检测风力发电机的输出电压，并调整励磁电压来控制输出电压的大小。若为发电机增加一个变流器，则变流器既可以控制输出电压大小，又可以控制输出频率。

8.11 电压、有功和无功功率

众所周知，电压是驱动电子（电流）流动的动力。电压越大，促使电流流过系统的动力越大。系统中的电压乘以电流，结果就是功率，单位用瓦特（W）表示。电路中的电流取决于不同类型的负荷。一种为纯电阻负荷，包括热水器加热元件、电炉加热元件和白炽灯；另一种为感性负荷，包括发电机电枢绕组、励磁绕组和其他电抗器（线圈）；第三种负荷为容性负荷，包括用于校正功率因数的电容器，以及一些计算机电源中的电容。

有功功率也称为有用功率，是电压和流过纯阻性负荷的电流的乘积。流过纯阻性负荷时，电压与电流同相位，因此不会产生无功功率。当电压和电流经过容性或感性负荷时，电压波形滞后或超前电流波形。流过容性或感性负荷的功率称为无功功率[㊀]。有功功率（*TP*）和视在功率（*AP*）的比值称为功率因数（*PF*）。功率因数的公式为 $PF = TP/AP$。因为有功功率总是比视在功率小，因此功率因数总是小于 1 的。*PF* 越接近 1，电路效率越高，损耗越小。

只要电压和电流的相位不相同，就会有电能损耗产生。如果电网线路中有大量的大型电动机，那么此线路会由于感性负荷而存在电能损耗。在线路中可以用等量电容器来补偿感性负荷，用电容器来补偿感性负荷消耗的无功功率，这属于功率因数补偿。改善功率因数的电容器可以装在存在感性负荷的用户端（如工厂），这可使用户得到优惠的电价。电容器也可以安装在发电侧或供电侧，这是因为有时候感性负荷分散在电网的各个地方，如用户地区大量空调器压缩机的电动机，此时不能每一家都安装补偿电容，因此电网公司把电容器集中安装在供电侧。这就要求每一台风力发电机都应该配置电容器或其他无功补偿设备，以改善并网点的功率因数。每台风力发电机都必须满足并网标准要求，并按要求发出无功功率。

当采用笼型感应发电机作为风力发电机时，存在一个问题：笼型感应发电机将吸收无功功率。这些无功功率用于发电机励磁，其大小取决于发电机励磁电流的大小。如果一台独立风力机单机运行，无功功率问题不大，但当一个风电场的多台风力机都使用笼型感应发电机时，过多的无功功率问题不容忽视。风电场运行时，必须要有足够的电容储备来补偿接入电网的发电机的功率因数。

㊀ 原文为“视在功率”，此处应为“无功功率”。——译者注

8.12　低电压穿越

电网中的低电压问题可能会持续几个交流电压周期或几个小时。低电压是电网电压跌落 10% 或更低时的一种状态，可能是一相跌落，也可能是三相跌落。

风力机接入的电网发生低电压时，不管低电压是由风力发电机本身还是其他因素引起的，风力机都需要具有穿越这种状态的能力，此保护功能称为低电压穿越（LVRT）。电网中发生低电压时，电气仪器会记录下故障的严重程度及发生时刻。风力发电机必须要有实现低电压穿越的保护系统，而不是脱网或退出运行。如果电网的低电压问题由风力机自身引起，风力机需要迅速改变运行状态，或从电网中退出运行。风力机有三种控制方式可供选择：第一种方式是完全从电网中退出，等低电压状态清除后再重新联网；第二种方式是保持并网不间断运行并穿过低电压状态；第三种方式是保持并网不间断运行并由发电机配置的电容器组增加输出感性无功功率来改善电压，缓解低电压状态。风力机选用哪种方式设计依赖于它所连接的电网发生的故障类型和电网需求。

8.13　闪变和电能质量

闪变是电网中电压的一种短时变化现象，它会引起白炽灯等负荷的闪烁。在风力机作为唯一为居民或商业区供电的电源时，此问题影响较大。当风速短时增大时，发电机发出的电压偏高，灯泡会瞬时变亮。通常风力机的控制器能感受到这种由于发电机加速而引起的电压上升情况，并通过减少发电机励磁电流来使电压恢复正常水平。这个判别出过电压状态后施加控制措施的过程可能需要几秒，此过程引起的灯具亮度的增加可以被察觉到。在居民区，此问题可以采用变流器直接控制风力发电机输出的电压和频率来解决，也可以将风力发电机输出的电能储存到电池中，然后通过变流器持续地将电池中的电能转变为恒定交流输出的方式来解决。

如果风力机不通过变流器而直接接入电网，在发电机侧一定要采用更加准确的控制，以确保电压在相位和大小上的误差都降到最小。有些风力机用机械方式来控制由阵风引起的风力机叶片的速度变化，并以此来维持精确的电压和频率。这些类型的风力机可能采用叶尖速比和偏航的联合控制方法来实现不同风速时风力机叶片转速的控制。

8.13.1　电能质量

发电过程中的一些因素会影响电能质量，这些因素包括电压水平、频率、相位和功率因数。风力机的电气系统必须具备控制手段来改善上述每个因素中可能存在的缺陷。例如，电子调节器可用于控制励磁电流以确保在任何转速情况下发电机输出电压恒定。双馈发电机采用一些控制励磁电压频率的方法来确保发电机输出电压

频率维持在60Hz附近。风力发电机并网时，若发电机电压和电网电压相角不同，会发生相移问题。这就意味着一个正弦电压会先于另一个正弦电压几毫秒，即两个电压正弦波并非在同一瞬间开始于0°。风力机中，复杂的电子检测电路不停地检测电网电压相位，并在风力机并网之前控制发电机电压相位，使其尽可能地接近电网电压。如果风力机输出电压的相位与电网电压相差较大，则可以通过调整励磁电压来控制发电机电压使其相位接近电网电压，即使发电机电压正弦波和电网电压正弦波同时开始于0°。当两个电压相位相同时，并网开关闭合，风力发电机并入电网，向电网输出电能。

风力发电机中的测量电路还可以测量来自风力发电机或并网点的功率因数。若通过测量表明系统中有过多的感性负荷，则要在系统中接入电容器组来提供无功功率，改善功率因数。为了实现所需的功率因数控制，电容器组可能需要不停地接入和切出。例如，在一个工厂中，由于构成感性负荷的感应电动机可能会在一天内开关多次，系统功率因数也不断改变，因此，电容器组也要不断地投入或退出，以提高功率因数。功率因数监视电子电路将持续检测系统中感性负荷的变化，并及时调整投入的电容器组的电容值以改善电网功率因数。

8.13.2 孤岛

如果电网的一小部分从主网中切除运行，这种状态被称为孤岛。一个部分区域电网遭受雷击或发生短路时，可能会形成孤岛。此外，汽车撞倒电力塔杆或其他原因引起的断路器跳闸也有可能导致孤岛的出现。有时候对于一台接入孤岛中的风力机来说，它可以继续发出电能并为孤岛中的用户和负荷供电。此时会出现一个严重的问题，风力机的相位可能会偏离原本与电网相同的相位。导致孤岛产生的故障消除后，孤岛部分的电网会重新并入主网，但此时电压相位跟主网电压相位不再相同，这可能会在风力发电机中产生很大的浪涌电流，从而烧毁发电机。由于这个原因，不断地检测主网电压相位并在风力机并网时保证相位差最小是至关重要的。相位检测电路不断地检测风力发电机和主网的电压相位差，若相位差太大，风力机会通过并网开关从电网断开。当通过调整后发电机电压相位同电网电压相位差减小至允许范围内时，风力机再次并入电网。

8.14 接地系统

风力机的接地系统由一根或多根插入地下8ft深的铜制接地棒构成，塔架的金属框架和接地棒之间通过大量铜导体相连接。当风力机塔架同接地棒相连时，塔架金属部分的电势和大地之间并非完全相同。系统中的所有金属部分都应该与金属框架相连接，具体地说，它们可以通过螺栓和螺母的机械方式连接，或者采用一根导线和塔架的金属框架相连。这样可以保证塔架和系统中所有金属部分都与大地之间有一个低阻抗连接回路。若接地系统中使用不止一根接地棒，则所有接地棒应该连接在一起。

在风力机中，有两个独立的安全系统需要采用接地系统。第一，接地系统为风力机所有金属部分和接地棒之间提供了一条低阻抗接地路径。如果破损的带电导线与金属框架或风力机的其他部分相连，导体上的电压将立即对地形成短路，产生非常大的电流，短路电流将使用来保护高压线路的断路器或熔断器断开，从而使电路断开。如果系统没有接地，断路器不会断开，当人碰到带电的金属部分时便会受到电击，造成伤亡。如果发生断路器断开的情况，则应该检查系统是否发生短路。当断路器闭合又立即断开时，则应该怀疑系统中有短路发生，此时需要找到故障之前将线路隔离。

风力机第二个采用接地系统的是防雷保护系统。如果风力机叶片或塔架受到雷击，则雷电的巨大能量将被引至大地，避免设备损坏。反之，如果风力机和塔架没有正确接地，则雷击将会严重损坏风力机设备。用于防雷的接地系统需要定期检查，保证各部分正常连接，确保每一部分都与大地之间有一个低阻抗连接。

8.15　地下线路

大多数风力机的电力线缆是从地下通过导管连接到并网点的。从地下经过，一方面是为了保护电力线路，另一方面也是出于美观的角度考虑。若电力线路从空中架设，则需要使用电力塔杆和其他设备，这可能会影响风力机的维护，因为当风力机维护时需要用到大型起重机。电力线路通过电力塔杆架空敷设时，起重机操作者不得不需要时刻注意其位置，确保架空线路与起重机保持一定的安全距离。

地下导管通常注入到塔架基础的混凝土中，此外在风力机及其所接入的电力塔杆之间还装有其他导管。从图 8-13 中可以看到，有三个独立的导管从地下将电能引至电力塔杆顶端，电力塔杆顶端为并网点。如今，有一种设备能使导管在地下 3ft 或更深的地方穿行上千英尺，选择地下约 3ft 或更深的深度是为了避开地表的各种障碍。这种设备叫作水平定向钻，它采用液压系统为地下 3ft 或更深深度的钻头供能。水平定向钻由一个按 10ft 分段的管子推动钻头，使其逐渐靠近目标。每增加一段 10ft 的管子，技术员就要检查管子的位置、方向和深度。操作员用一个小操作杆来向左、右、上、下不同的方向调节钻头，以确保钻头和管子的方向和深

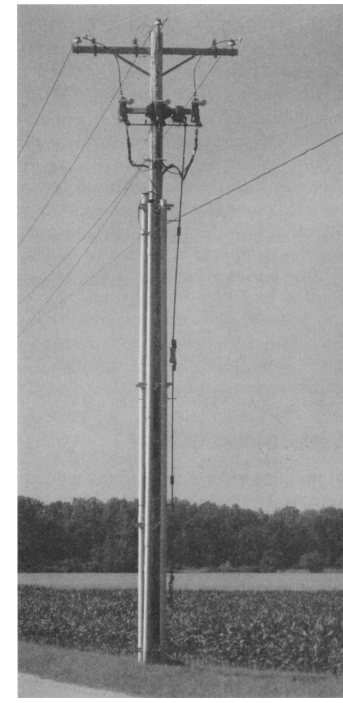


图 8-13　风力机和电网之间的电气连接。并网开关位于电力杆塔顶端，连接风力发电机和电力塔杆的电缆埋在地下，图中浅色的导管用于保护来自于塔杆地下并升至塔杆顶端的电力线路

度正确。在目的地挖一个直径为18in，深3ft或者更深的小洞。管子和钻头在地下推进，直到它们到达目标地的小洞穴。一旦钻头到达小洞穴，一大卷塑料导管将会被连接到钻头上，并通过钻头钻出的隧道被拉回去。定向钻头上的管子也被拉回，每次释放10ft的一节管子，当一节管子被拆下后将被收纳好以便下次使用。当最后一段管子被拉出时，塑料导管也被从一个地方牵引到了另一个地方，并且等待着最后的连接。塑料导管在制造时预先设置了一条能达到其长度的拉绳，这条绳子用于把电力线路拉入导管从而便于完成地下施工。定向钻可以在马路、树木以及其他地表物的下面掘进隧道并敷设导管和电缆。电力线路的地下安装要比地上昂贵，却可以防御冰雹、龙卷风和其他一些可能引起倒杆的事件。

8.16 电力线路敷设

连接风力发电机和电网的线路可以采取地下或架空的方式敷设。如果采用地下电缆的方式，则电缆之间的连接需要设置在沿着导管分布的检修测试点，如果出现问题，可以打开检修测试点以便检查。如果采用架空电力线路，线路之间的连接在电力塔杆和变压器处实现。电网公司和专门提供高压线路敷设和服务的公司已经运行多年，对此项工作早已非常熟练。当进行架空线路的接线时，一般采用带有液压升降设备的卡车将服务技术人员升到所需的工作高度。同样，这些公司也有能使地下线路敷设工作变得更简单的一些特殊设备。通常，这些电力线路敷设的工程都是由具有专业设备和受过专业训练的技术人员的公司完成。

8.17 架空线路

进出变电站的高压架空线路通过木质电线杆和钢制输电塔架设。图8-14是同时含有木质电线杆和钢制输电塔的例子。为了保证服务车在架空线下面移动时不碰到线路，架空线要具有足够的高度。通过电力塔杆支撑架空线的另一个原因是避免大风时线路缠绕到一起或相互接触。还有一个选择架空线的原因是电力线路周围的空气可以帮助其有效散热，从而可以最大限度地提高带载能力。

图8-14 将电能输入、输出变电站的木质电线杆和钢制输电塔

架空线路由电力线路和支撑线路的电力塔杆构成。一般，电力塔杆都靠近大街或高速公路，因为在这些地方电网公司可以拥有被称为“可行通道”的狭长空间。位于“可行通道”内电力塔杆下的大树一定要修剪，以确保在暴风雨或冰雪天气时不会碰到电力线路。图 8-15 示出了连接电力塔杆的电力线路，从图中可以看出电力塔杆和公路之间有一定距离。每个居民或商业用户都由一条从主干线到建筑物的电力分支线路供电，连接建筑物和主干线的线路称为架空引入线。从图 8-15 中可以看到位于电力塔杆的三台变压器下方的架空引入线。最初的时候这些塔杆被称为电话线杆，因为它们也用来连接电话线。如今电力线路、架空引入线、电话线和电视信号线可以位于同一塔杆的不同高度上。电力线路要连接每个地区的变电站，以确保每一个居民、商业和工业用户都与电网相连。

图 8-15　沿着街道和高速公路敷设的架空线路

8.18　风电场变电站

当一个风电场包括大量的风力机时，必须设置一座装有升压变压器的变电站，以便将电压升高后远距离输电。此变电站应位于风力机附近。图 8-16 是风电场中的变电站，所有连接风力机和变电站的接线均从地下导管中敷设。与电网相连的变电站出线采用架空线，电能通过高压输电塔和高压线路输送到需要用电的城市和工业区。风电场变电站内也安装了隔离开关、熔断器等电气设备。

图 8-16　风电场变电站

（图片来源：John Fellhauer，jfellhauer@ surenerhy. us）

8.19 民用及商用单电源电力系统

如果一台风力机直接与居民或商业区相连，则称为单电源电力系统，图 8-17 表示了一个单电源电力系统的设备。来自风力机的电力线路敷设在地下导管中，并与图中下方的开关和计量箱连接。如果可以由电网提供备用电源，则可以像普通的居民或商业区一样从架空线引入。在图中可以看到开关柜、计量箱以及来自电网的架空线路。安装风力机时，必须提供开关柜、电能表，并且要计入到风力机的安装成本内。在风力机向电网提供电能时，双向电能表以一个方向计量，而用户从电网而非风力机输入电能时，双向电能表反向计量。

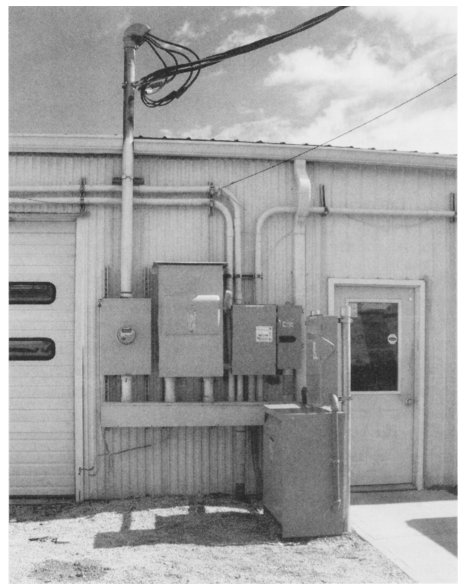


图 8-17 商业应用中的电气连接和计量设备，风力机提供的电能通过地下电缆引入，而电网提供的电能则由架空线引入

简 答 题

1. 什么是电网，它是如何将电能分配给用户的？
2. 什么是智能电网，它与传统电网的区别是什么？
3. 分辨电网的三个主要组成部分。
4. 说出联邦法律对电力公司从风力发电机购买电能的要求，并说明这个法律是哪一年通过的。
5. 解释变压器的工作原理。

6. 认识变压器的两个绕组。
7. 什么是变电站，为什么它对电网很重要？
8. 写出 IEEE 1574-2003 标准对接入电网的电能的技术要求的三个方面。
9. 什么是双向电能表？
10. 说出电能质量问题的两个要求。

选　择　题

1. 电网是（　　）。
a. 美国和北美其他地方的整个电力输配系统
b. 风力发电机和风力机塔架之间的电气连接
c 一个风电场内的风力机之间的电气连接
2. 智能电网（　　）。
a. 为常规电网，只能传输电能
b. 与电力用户之间可以输出和接收电能以及信息
c. 处理电能时可以对其滤波
3. 变压器的绕组包括（　　）。
a. 一次绕组和二次绕组
b. 输入绕组和输出绕组
c. 原边绕组和副边绕组
d. 以上全是
4. 变压器的电压比反映了（　　）。
a. 一次绕组和二次绕组的匝数比
b. 一次绕组和二次绕组的电压比
c. 一次绕组和二次绕组的电流比
d. 以上全对
5. 考虑到升压变压器和降压变压器，下列说法正确的是（　　）。
a. 升压变压器中的一次电压比二次电压高
b. 降压变压器中的二次电压比一次电压低
c. 降压变压器中的二次电压比一次电压高
d. 以上全对
6. 对于功率因数、有功功率和视在功率之间的关系，下列说法正确的是（　　）。
a. 功率因数为有功功率除以视在功率
b. 功率因数为由有功功率提供的视在功率
c. 功率因数是有功功率乘以视在功率
d. 以上全对

7. 低电压穿越（LVRT）是（　　）。

a. 像风力机这样的发电系统在电网电压下降过低时不会退出运行的能力

b. 风力发电机中的一种特殊电路，它可以在风力机没有与电网相连时保证提供正常电压

c. 在电网电压过高时使风力发电机退出运行的一种特殊电路

d. 以上全对

8. 闪变发生在（　　）。

a. 阵风时由于风力发电机加速或减速而引起电压升高或降低的情况下

b. 当电网电压引起风力机加速或减速的时候

c. 当连接风力机和电网的开关快速接通或断开时

9. 接地是（　　）。

a. 插入地下 8ft 深处的铜棒

b. 风力机的所有金属部分与连接地下铜棒的铜导体系统之间的电气连接

c. 实现风力机的雷击保护和短路保护的安全电路

d. 以上全对

10. 风力发电机的断路开关用于（　　）。

a. 接通和断开风力发电机和电网之间的电气回路

b. 调整由齿轮箱传输到发电机的机械能

c. 接通和断开风力机中传向发电机的机械能

第 9 章　塔架的形式、设计与安全

本章学习目标

读完本章后你将能够：

- 了解大型独管锥筒式钢塔和浇筑混凝土塔是如何组装的。
- 确定执行高空作业时要穿戴的安全装备。
- 认识锥筒式风力机塔架的形状。
- 认识桁架式风力机塔架的形状。
- 掌握联邦职业安全与卫生管理局（OSHA）关于风力机工作的安全规范。
- 了解什么是牵索以及它们是如何安装的。
- 阐述怎样通过安装用起重架和倾斜式塔架把风力机竖立起来。
- 明确竖立一个桁架式风力机塔架所需的步骤。
- 了解为什么安装风力机塔架的起重机要比风力机塔架高。
- 了解美国联邦航空管理局（FAA）在选择风力机安装位置时发挥的作用。
- 列出几种可以到达独管式风力机塔架顶部的方法。

本章关键词

自动降落（Automatic descent）
攀爬钩（Carabineer）
攀爬安全（Climbing safety）
立方体式风力机（Cube-type wind turbine）
电磁干扰（Electromagnetic interference）
疏散（Evacuation）
美国联邦航空管理局（FAA）
失效保护系统（Fail-safe system）
坠落保护（Fall protection）
安装用起重架（Gin pole）
接地故障保护（Ground-fault protection）
接地（Grounding）
牵索（Guy wire）
系索（Lanyard）
桁架式塔架（Lattice tower）
接闪器（Lightning arrestor）
独管式塔架（Monopole tower）
联邦职业安全及卫生管理局（OSHA）
救援设备（Rescue equipment）
安全制动器（Safety brakes）
安全带（Safety harness）
工作平台（Service platform）
停机制动装置（Shut-down brakes）
浪涌保护（Surge protection）
倾斜式塔架（Tilting-type tower）

本章概述

本章主要介绍关于风力机塔架的内容。由于通常高处的风力更为强劲，所以风

力机安装位置越高，可以发出的电能越多。例如，假设一个风力机安装在60ft高的塔顶将发出50kW·h的电能，但是如果同样的风力机安装到一个100ft的更高的塔顶，它可能会发出65kW·h的电能，即高出30%以上。安装在较高的塔架上的风力机能够捕捉到更多的风能，但同时塔架和塔基也要承受更大的压力。此外，安装在高塔上的风力机维修起来也比较困难。本章将阐述当今工业应用中的不同类型的塔架，并分别介绍它们的安装和维修方法，同时介绍不同类型塔架的优缺点。本章还将讲述适用于小型、中型、大型风力机的各类塔架的相关知识，如位于海上或其他水体上的风力机。

通过本章的学习，可以了解技术人员如何在塔内和塔外进行工作。起重机及其他设备为技术人员在不同高度的风力机上开展工作提供了方便。技术人员在高空上工作或进行攀登时需要配备安全保护设备，同时还要遵守在塔架周围和高空工作时的章程和条例，这些都要通过监管机构进行管理和监督。本章同时还将介绍有关风力机选址的原则和规范。

本章还将讲述需要维修技术人员爬到塔顶机舱或空中其他设备上完成的相关维护工作，介绍为使塔架更稳固而使用的牵索，以及如何定期检查牵索，讨论哪些塔架不需要牵索。塔架及其维护对于风力机来说并不是什么新鲜事，现在用来传输电力、广播、电视信号和提供移动通信服务的一些高塔，人们已经有多年的使用经验。这些类型的塔架与风力机塔架都存在相同的安全问题，它们的维护技术和维护设备也类似。

9.1 风力机塔架的类型

风力机塔架的类型从应用简单的小型钢管到较大的中型钢管各不相同。一些小型风力机塔架占地面积很小，可以通过滑轮和绳索并借助其他已经安装好的风力机将它们竖立起来。对于占地面积较大的大型民用或小型商用风力机，需要使用动力转向架或小型起重机将它们竖立起来。由于一些较小的风力机在高空不能进行全面的维护，需要吊到地面进行维护，因此常常使用倾斜式塔架。倾斜式塔架的设计借助于一个倾翻装置将塔架稳固在地基并将其向空中竖起，之后用牵索将塔架固定。当风力机需要检查或维修时，就可以把塔架降落到地面，这样就可以安全地进行工作。

另一种类型的塔架叫作桁架式塔架，它通常是一个三足支撑的由多节（段）构件构成的塔架，风力机安装在其顶部。图9-1是一个桁架式塔架的例子，桁架式塔架提供了一个开放式的阶梯结构，便于检修时攀爬。桁架式塔架通常并不需要牵索来加固，因为它有较大的塔基，即使在强风中都不会晃动。然而大型的风力机通常不使用桁架式塔架，而更多地使用独管式塔架（独管即一个支撑点）。独管式塔架是一种较高的塔架，其高度范围在60～100m之间。

9.1.1　小型风力机的钢管式塔架

小型风力机的塔架一般是由直径为 1.5 ~ 3in 的钢管做成的。风力机叶片或发电机越大，管道直径也越大，图 9-2 就是这种类型的小型风力机塔架。小型风力机塔架的高度一般为 30 ~ 90ft，塔架的高度是由风力机所处位置和区域限制决定的。在允许的范围内，风力机要安装的尽可能高，以便获取最大的风能。

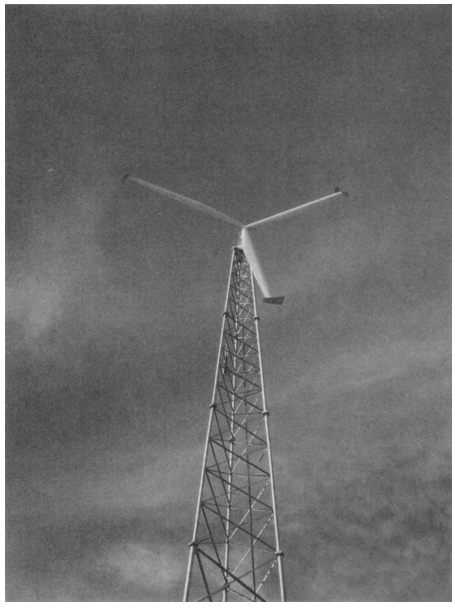


图 9-1　桁架式风力机塔架

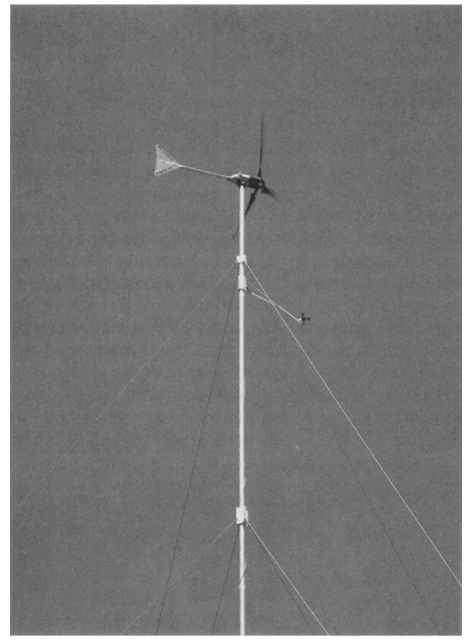


图 9-2　小型风力机的钢管式塔架，注意保证塔架在强风下安全而在不同高度连接的牵索（图片来源：Southwest Windpower）

从图 9-2 中可以看到，牵索连接在塔架的不同高度处，这些牵索向外拉伸至地面以保证塔架和风力机的稳定。从图中可以看到，沿着塔架装设的牵索中，那些连接在塔架顶部和中部的牵索能够给塔架提供最佳的支撑。有时可能有 4 条或更多牵索为塔架各部分提供支撑，这样即使风速最高的时候，塔架也不会弯曲或者晃动。塔架及其牵索必须定期检查，确保牵索没有松动或腐蚀，并确保塔架尽可能垂直固定。如果牵索的一个连接点松动，将使塔架偏移其垂直位置。地面上牵索的保护措施是很重要的，要确保人们在地面牵索区域内工作时不会被绊倒，并且草坪修剪机不会工作在这个区域。这就意味着在有些地面上有牵索的区域，周围需要修建篱笆隔离。

由于这些塔架的高度接近 100ft，因此必须在塔架竖立之前将这些铁管连接在一起。通常对于较小的风力机设备，应先在地面上将风力机牢固地安装在塔架上，然后用起重机或滑轮将塔架拉起，当塔架竖立后将其固定在塔基中。塔基和混凝土

基座必须在塔架安装之前的数天内建设好，以便混凝土基座成型，不至于在安装塔架时发生断裂。一旦将塔架放置到位，叶片随风转动时塔架基座将会承受相当大的压力。可以这样理解，如果风力机捕获的风能是 10kW · h，也就是说有 10kW · h 的机械能量反作用于叶片和塔架并试图使风力机倾覆。支撑风力机的有塔架、塔架基座、混凝土座及牵索，如果这些支撑的力度没有风的力度强，那么在强风时，风力机就会被损坏。设计时，了解风力机所能承受的最大风力是很重要的。

9.1.2 风力机塔架中应用的圆柱管

对于大多数风力机设备，其塔架圆柱管是专门为风力机应用而设计的。一些小型系统的塔架则采用普通圆柱管以降低成本，但是这样的塔架往往不够结实，当风强度较大时即使有牵索的支撑也无法保证风力机的安全。随着小型风力机应用的增加，也有一些专门为小型塔架设计的圆柱管。

每截圆柱管的高度一般是 8 ~ 10ft，通过串接可以任意组装成 20 ~ 100ft 高的塔架。轮毂上装有叶片的风力机安装在圆柱管的顶端，当风力机被安装到最后一节圆柱管时该节圆柱管需要离地 5 ~ 8ft，以保证叶片安装时离地面足够远或者被安装到塔架顶端时不至于被损坏。当发电机和叶片被安全安装到最后一节圆柱管上后，它将被移动到靠近基座的位置，以便起重机或起重设备完成最终的安装工作。当塔架被竖立到垂直位置时，连接牵索并拉紧以确保塔架的安全。

9.1.3 倾斜式塔架

倾斜式塔架是专为较小型的风力机设计的。在安装后，这种小型风力机及其塔架需要定期下放到地面进行检修和维护。该塔架需要将一个倾翻装置安装在专为支撑该型号塔架而特别构建的混凝土基座上。当钢筋混凝土基座被浇筑好以后，用于安装倾翻装置的螺栓将被固定在精确位置上。待混凝土凝固后就可以将倾翻设备安装在已经固定好螺栓的混凝土基座上，然后将螺母拧紧固定倾翻设备，最后将塔架用螺栓紧紧地连接在倾翻设备上。

一些较大的倾斜式塔架可能需要借助小型起重机才能被提升到垂直位置。其他一些小型倾斜式塔架，可以在倾翻装置被安装到混凝土基座的螺栓上后，用绞车、索具或其他机械手段提升到垂直位置。接下来的步骤就是将塔架移动到倾翻设备的合适位置并通过螺栓将其安全固定在上面。一旦被可靠地固定在倾翻设备上，塔架就可以轻轻升起，为在塔顶安装风力机叶片留出足够的空间。当风力机被安装在塔架上后，就可以用绞车或者起重机将塔架吊到垂直位置。

另一种类型的倾翻设备称为安装用起重架，图 9-3 和图 9-4 为两个采用安装用起重架来竖立小型风力机塔架的例子。安装用起重架是在风力机主塔架的基座处以与其呈 90°的方位安装的一个附加塔架。当风力机主塔架移动到基座时，主塔架与地面平行而安装用起重架指向上方。用绞车或者车辆向下拉动安装用起重架的高角臂，这样就使得风力机主塔架移动到垂直位置。当塔架到达垂直位置时，插入固定器件将塔架可靠地固定在垂直位置。当塔架处于垂直位置并通过螺栓固定在混凝土

基座上后，就可以移除安装用起重架并将其存放，以备需要降下风力机进行检修时再重新使用。

图 9-3　采用安装用起重架竖立的小型风力机（1）（图片来源：美国能源部 NREL）

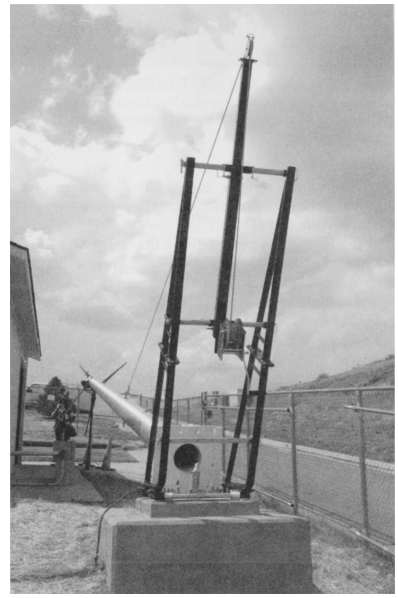


图 9-4　采用安装用起重架竖立的小型风力机（2）（图片来源：美国能源部 NREL）

如果塔架需要牵索，那么要在塔架安装前将牵索连接到塔架上，并在塔架竖起来以后将牵索最终固定在地面上。一旦风力机塔架被竖立到接近垂直时，通过调整牵索就可以将其最终精确定位。此外，为确保强风来袭时塔架不会移动，牵索需要适当地拉紧。

9.1.4　牵拉型和非牵拉型桁架式塔架

桁架式塔架是一种开放式塔架，一般为三足式，如图 9-5 所示。“桁架”一词来源于塔架的金属结构及其横梁构件的外观。从图 9-5 中可以看到，这种塔架类似于一个广播或电视发射塔，它提供了一个可方便技术人员攀爬塔架并对风力机进行高空作业的框架式结构。桁架式塔架有 3 个通过金属横梁相互连接的刚性支架，这些金属横梁连接在一起构成从上到下依次排列的三角形状，为 3 个刚性支架提供了最大强度的支撑。

从图 9-6 中可以看到这种类型的塔架底部宽，顶部窄。由于这种塔架为框架式，所以它是主要用于承载小型、中型风力机的轻型塔架之一。桁架式塔架为风力机提供了一个坚实支撑平台的同时，也不会像实体塔架那样阻碍风的行进。这就意味着风可以在不受较大阻力的情况下直接穿过塔架，而风的阻力会带来塔架在其生命周期内的维护和磨损问题。

桁架式塔架的一个缺点是容易攀爬，这样可能会有一些人未经允许试图攀爬，并由此引发风险责任问题。它的开放式结构也为鸟筑巢提供了条件，为鹰和其他食

肉性鸟类提供了捕食平台。尽管相比某地区内猫所捕杀的鸟的数量而言，同一地区风力机造成的鸟类伤亡情况并不是很严重，但仍然引起了环境保护组织的重视。一些保险公司可能会要求在这些塔架周围较大直径的范围内设置禁区，以确保不会有人未经允许试图攀爬。

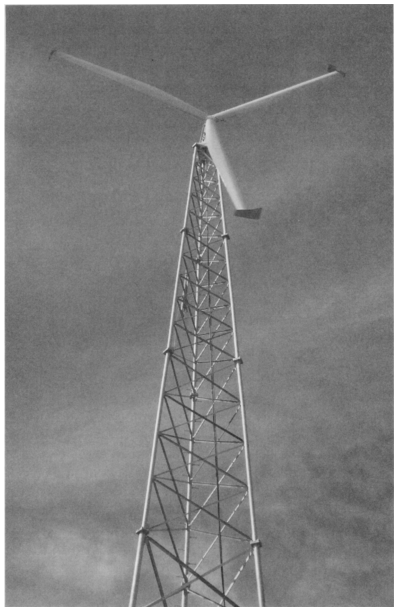


图 9-5　桁架式风力机塔架

图 9-6　桁架式风力机塔架例子，可以看到塔架底部最宽而顶部最窄

桁架式塔架一般在最后竖立的地方进行组装，也可能是将各部分安装好再运到现场，并在现场最终完成大部件装配。为了安装简便，塔架各部分之间通常通过螺栓连接。图 9-7 是一个刚刚组装起来的桁架式塔架侧面图，在该图中能看到焊接有固定件的塔架支脚。

图 9-7　现场组装好的桁架式塔架，注意焊接有固定件的塔架支脚

（图片来源：John Fellhauer，jfellhauer@ surenergy. us）

图 9-8 表示了技术人员在未竖立的塔架顶部安装风力机的情况。塔架顶部的小型风力机被提升至空中数英尺的高度，为安装发电机和叶片留出空间。当在塔顶安装风力机时，应采用一个支撑结构将塔架

顶端部分固定在离地约 5 ~ 8ft 的地方。叶片可以在风力机安装于塔架之前安装，也可以在风力机安装到塔架之后安装。从图 9-8 中可以看到，风力机已经安装到塔架上，但是还没有安装叶片。也就是说，当塔架还在地面上时，首先会将风力机安装在塔架顶部，之后再进行叶片的安装。而在另一些机型中，在风力机安装到塔架之前叶片就被安装好了。

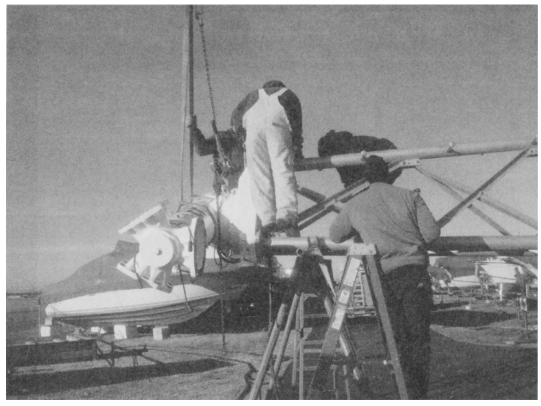


图 9-8　在桁架式塔架顶部安装风力机，当塔架在地面时叶片已经被安装好
（图片来源：John Fellhauer，jfellhauer@ surenergy. us）

桁架式塔架在地面上时，也可以完成一些其他的安装任务。例如将电缆从风力机通过塔架直接连接到底部。图 9-9 中表示了塔架还在地面上时敷设电力电缆的情况。由于风力机和桁架式塔架都平放在地上，所以这是一个相对简单的任务。如果塔架已被竖起，则这个任务就会比较困难，因为安装人员必须带着很重的电缆一直从塔架底部爬到顶部。当塔架在地面上时，电气接线及紧固螺栓等硬件装配工作是非常容易的。一旦塔架被竖起，这些简单的任务就会变得更加复杂费时。在塔架竖立之前，可以将电缆线固定在塔架侧面。在此期间，还要在一个或者多个风力机叶片周围缠绕紧固绳索并且固定在塔顶，防止在起重机吊装时叶片旋转和损坏。

技术人员在塔架上安装了风力机，在转轴上安装了叶片之后，就会把起重吊带或吊索系在风力机周围和塔顶，然后将塔架提升到垂直位置。一旦起重吊带系好之后，它就可以与起重机上的链索连接并被拉升到相应的位置。图 9-10 为技术人员将起重吊索系在风力机和塔架顶部，为起重机吊装做准备的情景。图 9-11 中起重机开始提拉塔架和风力机，使桁架式塔架到达垂直位置。当塔架完全垂直时，技术人员会给起重机操作人员发信号开始降低塔架。技术人员会对塔架位置做适当的微调，保证塔架的支脚与螺栓的排列一致，使塔架底部安装支脚上的螺孔正确地对准混凝土基座上的螺栓。随着塔架逐渐放入安装位置，技术人员开始在螺栓上安装螺母和垫圈并紧固，最后安装到最终位置。图 9-12 是技术人员在螺栓上安装螺母和垫圈，并将螺母拧紧以确保塔架固定在混凝土基座上的过程。

图 9-9 在未竖起的桁架式塔架中安装电缆（图片来源：John Fellhauer，jfellhauer@ surenergy. us）

图 9-10 技术人员将吊索系在风力机和桁架式塔架顶端，为起重机吊装做准备（图片来源：John Fellhauer，jfellhauer@ surenergy. us）

在塔架安全地固定到地基上后，技术人员会爬到塔架顶部将风力机上的起重吊索移除。同时，当塔架竖立到垂直位置后，也将移除那些用来防止叶片旋转的绳索。

一些为风力机提供刚性平台的桁架式塔架的基座不够宽大，这意味着在强风条件下当叶片获得最大风能时，塔架顶部会发生轻微晃动。这种情况下通常应使用带有牵索的塔架，保证风力机在强风中能够安全运行。图 9-13 是一种带有牵索的桁架式塔架，这种塔架被称为牵拉型桁架式塔架。当塔架还在地面上时就将牵索连接在塔架上，在塔架竖立的过程中牵索随着被拉升到位。如果一个塔架有 8 或 12 条牵索，就需要几个技术人员配合工作，防止在塔架拉升时各条牵索缠绕在一起。与地面相连的牵索末端必须向外拉以靠近其最终位置，防止与风力机叶片或者桁架式塔架纠缠在一起。一旦塔架靠近垂直位置，就可以把牵索连接到嵌入地下的紧固件上。这时牵索必须有足够的松弛度，以便将塔架轻微调整到最佳位置。为了确保塔架在完全垂直的位置，拉紧牵索的过程可能需要几个小时。为确保风力机在塔架上的稳固性，牵索必须具有足够的拉力。需要定期检查这些牵索老化程度，确保其拉力适当。随着时间的推移，风力会导致塔架发

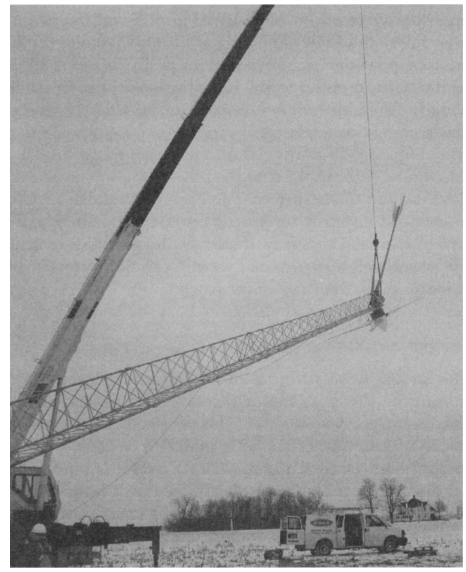


图 9-11 起重机开始将塔架竖起到垂直位置（图片来源：John Fellhauer，jfellhauer@ surenergy. us）

生少量的移动，这将导致牵索轻微拉伸。发生这种情况时，必须调整牵索以确保塔架结构的整体性。

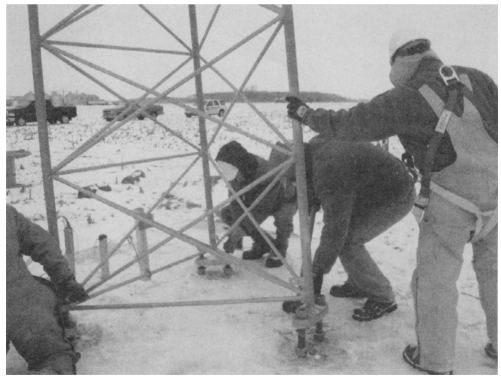


图 9-12　工作人员用螺母和垫圈固定塔架底部（图片来源：John Fellhauer，jfellhauer@ surenergy. us）

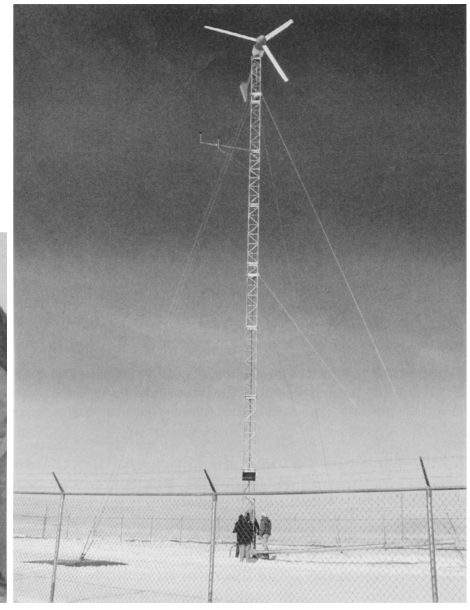


图 9-13　安装好牵索的桁架式塔架（图片来源：John Fellhauer，jfellhauer@ surenergy. us）

9. 1. 5　独管式塔架

为了获取更多的风能，较大的风力机一般安装在约 50 ~ 80m（164 ~ 262ft）的高度，这些类型风力机使用一种被称为独管式塔架的塔。图 9-14 是几台安装在独管式塔架上的风力机，其功率约为 1. 8MW。这些风力机安装在超过 250ft 的高空，远远大于其周围树木的高度，所以能确保可以获取最大的风能。由于强风时风力机获取的风能最大，此时塔座必须能够支撑机舱和叶片的重量，并且保持风力机的位置固定，因此塔架从基座到顶部都要保证足够坚固和牢靠。有些独管式塔架是由钢做成的，并且其内部为空心结构，以便安装梯子让技术人员能够从内部爬到塔顶，进入机舱内进行维护。还有一些独管式塔架是由混凝土做成的。

图 9-14　安装在独管式塔架上的大型水平轴风力机

图 9-15 是另外一台采用独管式塔架的风力机，从图中可以看到，塔架的底部比塔顶大。这种粗大的底部可以提供更可靠的保障，即使在强风中也能够保证刚性支撑。相

对窄小的塔顶可使塔的整体重量减轻，同时也使得塔顶强度和稳定性非常好。

9.1.6 大型独管式塔架

世界上最大的风力机一般都安装在独管式塔架上。Enercon 公司生产的 E-126 机型为欧洲较大的风力机之一，这种安装在德国的风力机的转子直径是 126m（413ft），由 36 段预制混凝土件做成的塔架的高度超过 131m（429ft），风力机总高度为 198m（649ft）。较大的独管式塔架可以由预制混凝土件或结构钢制成。图 9-16是一个独管式塔架的安装现场，特大型起重机正在将独管式塔架的部件提升至高空。图 9-17 显示了一个附近行走的人与塔架底部的高度比较。图 9-18 为一台大型起重机正在试图将转子吊装在已经安装到塔顶的机舱上的情形。图 9-19 是一台已完成安装的风力机，转子和叶片均被安装到机舱上，然后被整体安装在塔顶。

图 9-15 独管式塔架的底部比顶部更加粗大，这种坚固的设计结构可以使风力机能够承受较强的风力

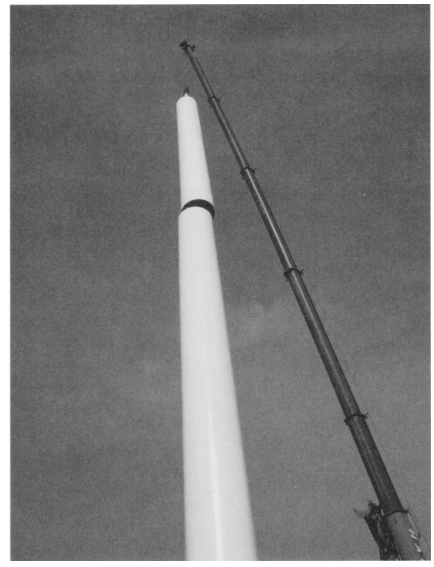


图 9-16 采用大型起重机安装大型塔架（图片来源：Northern Power System Inc.）

9.1.7 通过螺栓连接的大型钢塔部件

如果塔架是由钢制成的，它必须由一节一节的构件连接而成，每一节均用螺栓紧固以保证塔架的安全性。图 9-20 为大型起重机将一节塔架放置到另一节顶部的情况。当两节构件连接在一起时，它们均有一个排列着大量螺栓孔的凸缘。图 9-21是钢塔的内部，图中箭头所指的螺栓将每节塔架的凸缘连接在一起，将带螺纹的螺栓插入凸缘孔中并通过螺母连接和固定。

如果塔的各个部分连接不可靠，塔架就可能倒塌或不能为风力机提供足够的支撑。如果塔架设计不正确或安装不正确，都可能会损坏叶片和机舱。用于固定铁塔的螺母和螺栓必须定期检查腐蚀度、密封性，以及任何其他可能引起故障的问题。

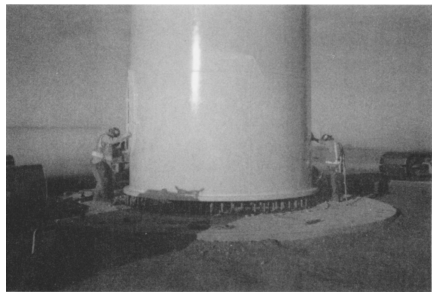


图 9-17　大型风力机的塔架底部，注意与附近技术人员的高度比较（图片来源：美国能源部 NREL）

图 9-18　大型风力机叶片的安装（图片来源：Siemens Wind Energy）

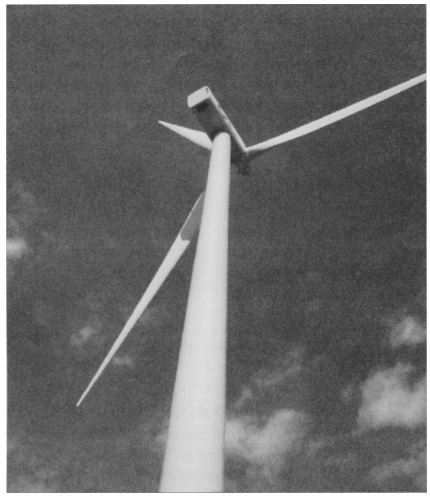


图 9-19 大型水平轴风力机及其高塔（图片来源：Northern Power System Inc. ）

图 9-20　用于组装钢塔各节构件的大型起重机。每一节部件都要与另外一节通过凸缘部分的螺栓紧固在一起（图片来源：美国能源部 NREL）

在塔架竖起并且机舱各部分安装完成后，首先将机舱安装到塔架上，然后将转子吊装到机舱前方端口并安装到低速轴法兰上。当转子装好后，就可以将叶片吊升到转子处并与之连接。图 9-22 中，一台起重机正在吊装叶片，这些叶片最后要被固定在转子上。在下节，将介绍更多塔架内的设备，如楼梯以及用于扎捆从塔顶发电机一直延伸到塔底的电缆的设备。

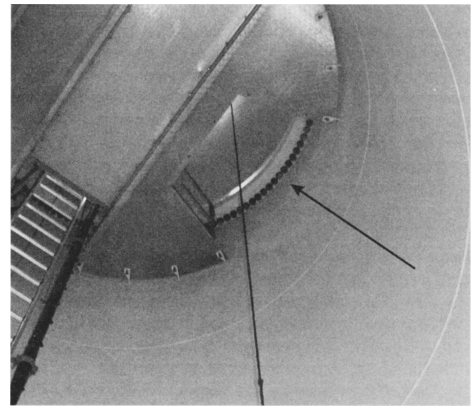


图 9-21　箭头指向的螺栓用于将上、下两节塔架构件连接在一起

9.1.8　安装塔架的提升设备和起重机

当用较高的塔架来支撑大型风力机时，需要用到高大的起重机，它可以抵达风力机塔架顶部并且能够把机舱和叶片提升到正确的安装位置。图 9-23 是一台高大的起重机，其中间部分通过液压杆操作。该起重机的顶端与液压杆相连，当起重机就位时，液压杆通过大型液压缸把起重机顶部延伸到风力机上，起重机的缆绳将叶片或维修配件吊到风力机塔顶。由于起重机要比正在安装的风力机更高，所以它必须要足够大且具有能将沉重的塔架部件、机舱以及叶片提升到合适高度的能力。

图 9-22　将叶片吊装至转子的起重机，当叶片定位后技术人员通过螺栓将其固定在转子上（图片来源：Nordex）

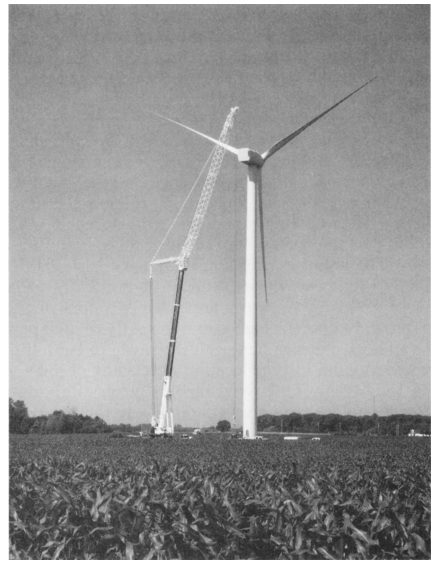


图 9-23　起重机的液压杆在液压系统作用下伸出，使起重机能够到达风力机高度

当起重机完成工作后，必须降落并分拆，以便可以通过公路运输到下一个地点。之前的一些图（见图 9-18、图 9-20）展示了一些大型起重机，从图中可以看到它们比风力机要大很多。这些大型专用起重机从一个地点移动到另一个地点的费用非常昂贵。对需要租赁起重机进行安装或维修的工作，其成本是按天或小时计算的。在较大规模的风电场中，起重机可以固定于一个地区，因为它可以在同一个地点完成对许多不同风力机的工作。

图 9-24 是一个适用于中小型独管式或桁架式塔架安装的中型液压起重机。由于独管式塔架比桁架式塔架略重，因此独管式塔架需要更大起重能力的起重机。图 9-25 是一个适用于桁架式塔架的小型起重机，由于桁架式塔架轻得多，起重机的起重高度比其起重能力更为重要。当需要吊装塔架时，需要租赁一个起重能力、提升高度能够完全符合要求的起重机。安装过程中，需要给起重机操作员提供塔架的重量数据，或者从塔架的技术资料中搜集相关数据提交给起重机操作员。在搬运和安装塔架的时候，起重机的负荷能力是非常重要的。当起重机的液压杆完全伸直并以 45°角倾斜时，负荷重量施加在液压杆上的力矩最大。在实际工作中必须相信起重机操作员在这些问题上的判断，只有这样，在安装塔时才不会给风力机带来风险。如果计算不正确，很容易翻倒起重机，或者在起重过程中损坏塔架，这些都会严重损害风力机设备。

图 9-24　用于吊装中小型独管式风力机塔架的中型液压起重机（图片来源：John Fellhauer，jfellhauer@ surenergy. us）

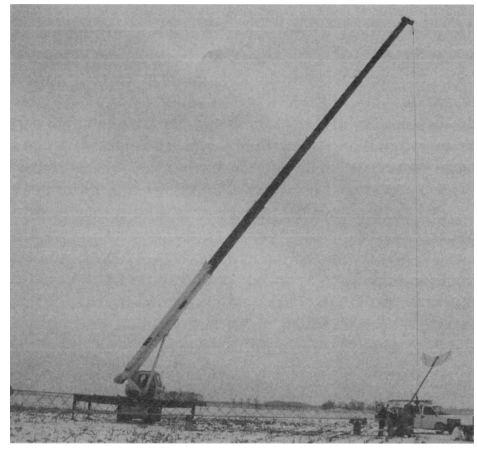


图 9-25　用于吊装较轻的桁架式风力机塔架的小型起重机（图片来源：John Fellhauer，jfellhauer@ surenergy. us）

9.1.9　美国联邦航空局对风力机塔高的限制

由于风力机塔架过高会对飞机飞行造成危害，美国联邦航空局（FAA）对任何由于太高而可能对航空空域或航空通信/导航技术带来影响的所有物体和目标具

有监管权利。如果风力机塔架太高，它可能会造成一些威胁：比如被飞机无意中撞上，或者可能会引起雷达或无线电通信等问题。如果一个地区有多台风力机时，风力机可能会产生使雷达探测不到风力机后面区域的障碍，从而造成雷达的盲区，对雷达产生影响。

由于这个原因，美国联邦航空局发布了一份关于物体高度的建设性意见通报（条例 7460-1），公告指出，任何高于地表 200ft 的建设项目都要进行审核（或在某些情况下低于这个高度，例如与一个带有 3200ft 长跑道的公用机场相距 20000ft 左右的项目）。这意味着任何超过 200ft 的风力机项目，必须提交审核。在过去几十年间，风力机的高度已增加了许多，因此这个规定已经被应用到越来越多的风电项目上。美国联邦航空局认为，必须研究风力机对附近空域所产生的下述几类影响：①地表低空飞行区域的占用；②运行影响；③电磁干扰。

在条例 7460-1 颁布以后，美国联邦航空局针对所涉及的领域和事项展开了一项初步研究，并发布了一份包含研究结果的报告。报告指出如果风力机的安装高度不会对飞航系统造成影响，将会对该项目给出无害于航空（DNH）的结论，获得“绿灯”通行并可立即实施。如果风力机高度或位置存在潜在问题，将会给出警觉性推测危险（NPH）的结论。确定 NPH 结论后，美国联邦航空局将开展更深入的技术分析（通常称为拓展性调查），技术分析中将说明美国联邦航空局可能关注的任何影响航空安全的问题。这个过程可能包括公众评议期，在此期间申请安装风力机的公司可以提供风力机安装相关情况的数据。美国联邦航空局将解释其关注点，并试着通过谈判重新商定一个可以接受的风力机高度和安装地点。如果风力机安装公司与美国联邦航空局仍然存在争议，美国联邦航空局将给出危害结论（DOH），并将其上呈至华盛顿的 FAA 机构。如果上呈的相关信息和数据没有改变结论，或者不能确保得到无危害结论（DNH），风力机安装公司可以向联邦法院上诉。

美国联邦航空局担心三个方面的问题：①地表低空飞行区域，即飞机降落、起飞或在飞机场上空盘旋时的路线；②运行影响，影响飞机目视飞行规则或仪表飞行规则的相关问题；③电磁干扰，这将影响到雷达或其他通信设施的工作。关于地表低空飞行区域问题，它通常主要指飞机起飞和降落时的飞行区域，有时称飞行走廊，以及飞机为等待着陆而在不同高度盘旋的机场周围区域。如果拟建风力机的位置影响了这些区域，风力机的高度就变得非常重要。运行影响与地表低空飞行区域问题类似，因为飞行员在飞行过程中要遵循的规则，即目视飞行规则（VFR）或者仪表飞行规则（IFR），会指导他们在靠近机场或其他飞机时的飞行方位。即使拟建风力机的地点没有直接建在飞往机场的道路上，但如果两个飞机相遇，飞行员可能需要从机场临时改变飞行航线。美国联邦航空局不希望飞行员担心风力机太高而对飞机可能造成威胁。风力机对雷达和通信设备造成的问题可能是在某些地区会使雷达信号变差，或者有可能引起对雷达显示屏幕的电磁干扰。对雷达造成问题的往往是位于雷达系统的探测距离 5mile 内的风力机。通常情况下，如果风力机较小

或远离航空活跃区域，FAA 认为它们是没问题的。

在某些情况下，当风力机建造地点靠近机场时，申请人可参考现有的塔架，如在该地区的手机信号发射塔等。如果 FAA 已经批准的手机信号发射塔比拟建的风力机高，那么就可能加快项目的审批时间，因为修建手机信号发射塔时已经考虑了该地区的情况。即使风力机高度非常接近这些大型塔，美国联邦航空局仍必须仔细分析这些风力机的影响。

9. 1. 10　自立式塔架（立方体）

另一种类型的风力机最近刚刚开始流行，即所谓的自立式塔架风力机，也称为“立方体式风力机”。图 9-26 表示了一个建在建筑物顶层结构中的塔架上的立方体式风力机。这种立方体型风力机在设计上采用了一个整流罩环绕在用于捕获风能的 5 个风力机叶片周围。由于这种类型的风力机有 5 个叶片，所以比起三叶片或四叶片风力机，它在同样风速情况下捕获的风能更多。由于五叶片的使用，该类型风力机结构比三叶片风力机的结构要更加牢固。图 9-27 是一个风力机加强部分的细节图，图中可看到的梯子是用于维修的，当风力机工作时梯子需要被移走。安装在塔架上的风力机外罩可以被设计为指向固定位置，也可以被设计为能够随着风向变化而旋转，从而跟踪风向实现最大风能捕获。在一些地方，为了获取更多的风能，可以在第一个立方体式风力机上搭建第二个立方体式风力机。

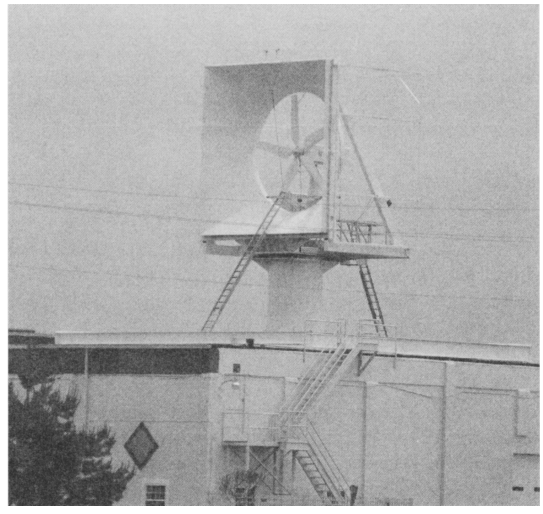


图 9-26　装有 5 个叶片的立方体式风力机

这种类型风力机因为有 5 个叶片，所以其塔架直径通常是传统风力机的近两倍。另外这类风力机的高度是比较低的，它位于建筑物屋顶弧线的正上方，周围的金属罩引导风从风轮叶片中通过，比没有外罩的风力机捕获的风能稍多。这种类型的风力机塔架可以建在建筑物的金属结构中，也可以建在地面的混凝土地基上，而建筑物建在其周围。在一些应用中塔架被直接安装到一个位于建筑物内部的宽阔的

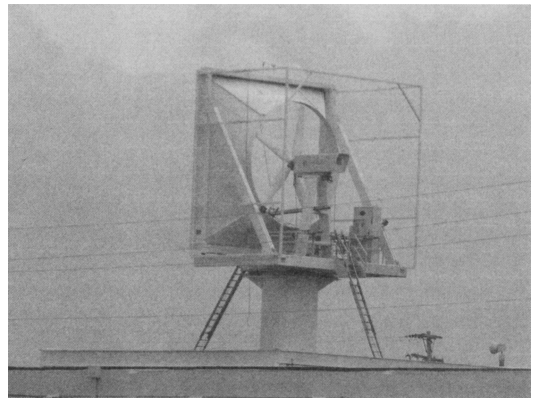


图 9-27 安装在靠近建筑物屋顶的塔架上的立方体式风力机，该结构提供了更便利的维护空间

混凝土地基上，建筑物的屋顶与塔架不直接连接，而是通过狭小的通道和梯子相连。这种风力机的特点之一是安装高度低，靠近屋顶从而维修方便。

9.1.11 安装于水域上的风力机塔架

研究表明，许多海洋或海湾地区往往是强风地带，大风持续时间很长。在过去，人们一直努力解决在水深从 20ft 到几百英尺不等的水域安装风力机的难题。如英国和挪威等一些国家，在这些地点安装离岸式风力机已经有多年的经验可以借鉴。图 9-28 就是一个海上的风电场，风力机相邻排成一条线。这些风力机的塔架必须在海底定锚或使用一些漂浮装置，使它们能够固定在正确的位置上以捕获最大风能。

图 9-28 海上风力机（图片来源：Siemens Wind Energy）

图 9-29 是在水域附近和水域上安装风力机的几个例子。图中左边第一个例子为采用常规技术的陆上风力机，该风力机塔架安装在靠近海岸线的陆地上。图中紧

接着的例子是浅水区安装的风力机，用轻型锚桩把风力机塔架固定到 200ft 深的水中。从图中可以看到，这种通过轻型锚桩固定到海床上的方案是安装塔架的一种方法。

第三种安装类型为中等深度水域安装风力机，适用于水深 200 ~ 1000ft 的水域，这种类型的塔架需要一个嵌入海洋底部的大型基础。因为这种类型的安装是在更深的水域，可以采用牵索帮助风力机塔架保持在特定位置。这种风力机塔架的塔基是一个嵌入到海底的混凝土基础。如果使用牵索，牵索的末端也要连接到嵌入海底的混凝土基础上。

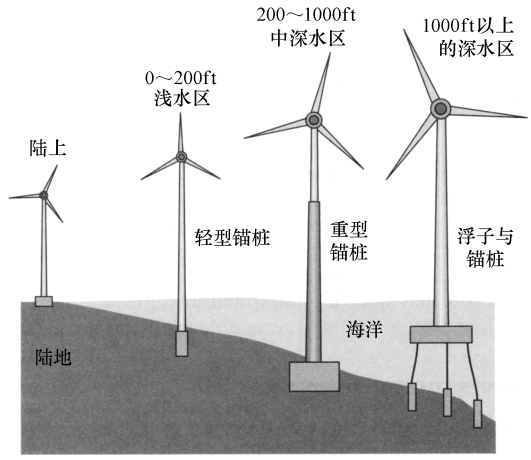


图 9-29　水域附近及水域上安装的风力机

图 9-29 中最后一种安装类型适用于水深超过 1000ft 的水域，在这种地方建造一个穿越海面直达海底的塔基是不经济的。这种情况下一般使用一个浮动平台，并用牵索将平台通过锚桩固定到海底。浮动平台可在海平面上，也可以被淹没，固定浮动平台的锚桩被深深置入海底。在一些系统中，通过不断调整牵索以确保风力机浮动平台的稳定，使风力机可以可靠地吸收风能进行发电。

图 9-30 是在海洋深水处安装的风力机，图 9-31 是一个安装在海湾的风力机。这种类型的风力机可以安装在浅水或深水等各种深度的水域中，安装地点的选择理由是根据此处水面上风速的持续性和可靠性而定。相比陆上风力机，水上风力机的一个缺点是塔架和锚桩更容易氧化，特别是在咸海水之中。其他问题还包括，一些国家法规和地方法规要求风力机要安装在视野之外的地平线位置，让人们在海岸边看不到它们。湖滨和海岸线的房产是非常昂贵的，而这里大部分业主都不希望风力机出现在视野内。

影响海上风力机的问题主要与离岸（海上）因素有关，例如风力机与海岸之间电缆的防腐蚀保养和维护。由于这些设施长年累月浸泡在淡水或咸水中，所以必须考虑腐蚀问题。海上风力机安装的另一个问题就是连接海上风力机与岸上变电站的电缆的敷设，目前许多电力公司通过海底电缆向小岛屿供电，所以它们对水下电缆有着大量的经验，一些技术可以被用到海上风电。在海上，水下电缆的主要问题包括最大限度限制腐蚀，以及提供适当的固定锚，确保风暴期间电缆不会被移动或拉伸。

海上设施的另一个问题是由于暴风雨或飓风导致的强风，这一类问题的处理办法基本上有两种：一是建立一个能够承受强风的风力机；二是建立一个能够迅速避让飓风的风力机。两个方案的成本都会影响海上风力机的发电收益。

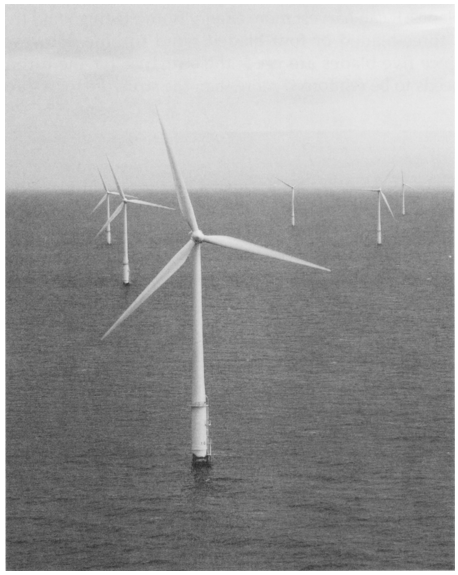


图 9-30 安装在 30～50m 深度水域的风力机
（图片来源：Vestas Wind System A/S）

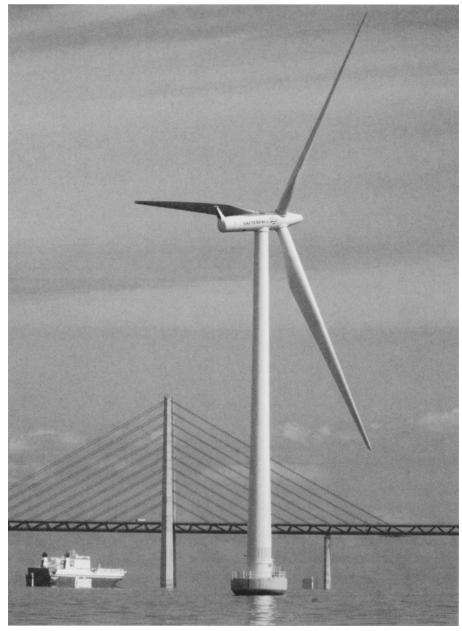


图 9-31 海上风力机
（图片来源：Siemens Wind Energy）

9.1.12 安装在现成轻型塔杆上的商用风力机

小型风力机的另一个应用就是降低某些城市地区或农村地区的照明费用。例如，在夜晚，许多汽车销售店可能需要大量的灯光来照亮销售区域，这时可以把风力机安装到现有的灯杆上。使用连接电池的电源逆变器或者用作电网后备电源的电源逆变器，将风力机发出的直流电转换成交流电使用。图 9-32 是一个安装在灯杆上的风力机，有风时风力机对电池充电或直接给路灯提供电力。由于灯杆已经建好，如果塔杆的强度足以支撑风力机，就可以将风力机直接安装在现有的灯杆上。太阳能发电也可以应用到类似工程中，白天可以对路灯的电池进行充电。这种应用中路灯也可以采用使用直流电的节能灯，这样就不需要使用逆变器将储存在电池中的直流电转换成交流电。

如果路灯塔杆不能支撑风力机，或者如果照明设施效率较低，那么更为实际的做法是重新安装具有高效照明装置并配有电池箱的新型电力塔杆。在一些民用和农业等应急照明中，需要用到一些小型照明设施，这些应用除了利用太阳能之外，也可利用小型风力机提供电能。这种类型的照明还可以用在收费站或主要公路的出入口以及居民区街道上。利用风力机或者太阳能照明可以为街道路灯节省 70% ～80% 的电力。安装一些能够同时为 4～5 个路灯提供电力的较大的风力机和太阳能设备，比为每一个路灯安装一个小型风力机更具实际应用价值。

图 9-32　直接安装在照明塔杆上的风力机
（图片来源：Southwest Windpower）

9.1.13　垂直轴风力机塔架

风力机的另一种类型为垂直轴风力机，图 9-33 是一个包括达里厄型垂直轴风力机的风电场。这个风电场中的达里厄型垂直轴风力机的安装类似于大型塔架上的大容量风力机，但这种垂直轴风力机没有大型商用发电设备工作效率高，所以大部分都已经被关停或不再用于商业化电力生产。这种风力机需要很多使塔架上端固定的牵索。图 9-34 为超静音型垂直轴风力机，图中安装风力机的独管式塔杆高约 25ft，这类风力机不需要牵索。它们也不需要为了提高效率而调整朝向，因为叶片能够获取来自任何方向的风。超静音型垂直轴风力机运行起来往往比水平轴风力机更安静，所以在民用或商业领域中应用比较广泛。

图 9-33　包括大型达里厄型垂直轴风力机的风电场，
注意每台风力机的大型塔基（图片来源：美国能源部）

图 9-34　超静音型垂直轴风力机

9.2　塔架的基础和混凝土基座

关于风力机塔架的下一步学习内容就是塔架的地面支撑和基础部分。许多中小型独管式风力机塔架都利用混凝土基础（基座）支撑塔架。图 9-35 为带有塔架固定螺栓的金属模板和为混凝土浇筑提供约束框架的木制模板，注意图中放在螺栓周围的圆环可以在混凝土浇筑和凝固时使螺栓保持在正确位置。通过工程计算，可以得出能够支撑特定尺寸塔架和风力机的混凝土基座的大小和深度。在某些情况下可能需要对土壤进行采样分析，确保地基能足够支撑混凝土基座和塔架。如果土壤为沙质或软质土，混凝土基座可能就需要适当加大并嵌入更深，以保证能够提供足够大的支撑力。

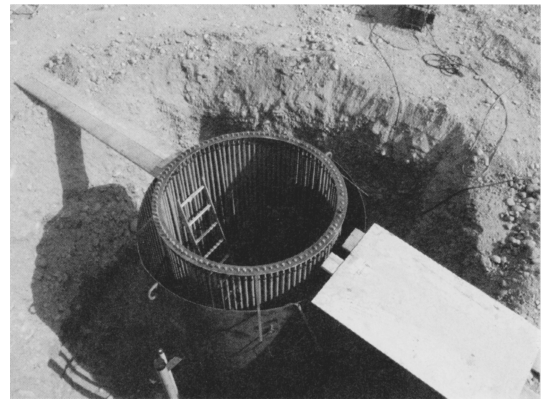


图 9-35　一台风力机混凝土基座的金属模板和螺栓，注意在混凝土浇筑和凝固时能使螺栓保持在正确位置的金属圆环（图片来源：Northern Power System Inc.）

图 9-36 为与图 9-35 相同的混

凝土基座，但图 9-36 为混凝土已经浇筑并凝固后的基座，可以看到图中螺栓位置和塔架位置完全对应。螺栓固定在一个作为模板的金属板上，在浇筑混凝土时能够保持螺栓固定。这个基座的真正大小并非图中所看到的那样，因为混凝土基座只有一小部分高出地面，实际上它的整个深度要足以支持风力机的塔架。

图 9-36　浇筑成型后的图 9-35 所示的塔架混凝土基座，
注意为了安装塔基而确定的螺栓排列位置
（图片来源：Northern Power System Inc.）

图 9-37 为支撑大型独管式塔架而挖掘的坑洞，坑洞内放置了金属加固材料。作为加固材料的钢筋通过缠结或焊接在一起确保混凝土基座有足够强的支撑力，能使塔架经受住最强烈的风力冲击。在大型塔架安装中，工程师们确定好塔架安装处所要挖掘的合理土层深度，而在开挖区外侧则放置了待用的混凝土或木制模板。基座的混凝土在浇筑时能与加强钢筋结构完全融合，使基座具有足够的强度支撑强风中的塔架。另外注意图中的金属圆环的作用是保持基座螺栓处在与要安装的塔架对应的位置上，在浇筑混凝土时所有的螺栓必须正确对齐，否则塔基就不能正确安放到螺栓上。混凝土浇筑后要把其周围用泥土填实，确保这个基础能够支撑风力机塔架。图 9-38 是已经浇筑完工的独管式塔架基座。

图 9-37　混凝土浇筑前被放置好和连接好的加强钢筋结构
（图片来源：美国能源部 NREL）

图 9-38 混凝土浇筑完成后的基座，
经过土壤填埋只有一小部分露出地面可见
（图片来源：美国能源部 NREL）

图 9-39 为在小型混凝土基座上安装的独管式塔架，看起来混凝土基座非常小，但实际上在地下还有很大体积的混凝土基座部分，这样能使塔架能够经受住强风冲击。将大部分混凝土基座掩埋在地下的目的就是为了确保只有少量混凝土暴露在外边，也使风力机的安装更加美观。图 9-40 为用来支撑桁架式塔架的大型混凝土基础。从图中可以看到，电气接线板和安装电线的导管都埋藏和浇筑在混凝土基座中，与塔架底部的支脚相匹配的螺栓也被对齐并浇筑在混凝土基座中，这样当塔架安放在基座上时，就能够准确地和螺栓吻合。图 9-41 显示了坐落在基座螺栓上的支脚，在螺栓上拧紧螺母后就可以将塔架最终定位并固定好。当混凝土凝固后其内部组件将不能进行任何移动，因此浇筑混凝土时用模板来保持螺栓的位置是十分必要的。

图 9-39 用于安装独管式塔架的混凝土基座大部分
位于地下，只有小部分暴露在地上
（图片来源：John Fellhauer，jfellhauer@ surenergy. us）

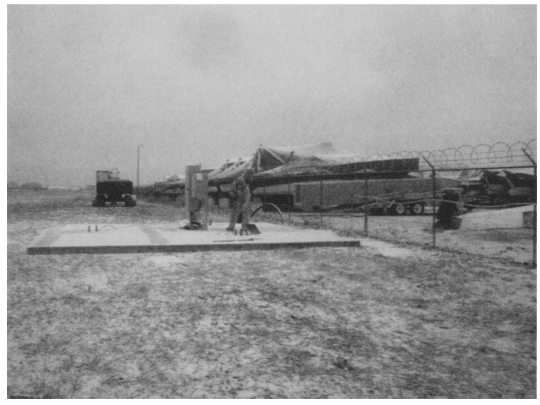


图 9-40　用来支撑桁架式塔架的混凝土基座，注意在基座浇筑时三套被浇筑在混凝土基础中的螺栓，同时风力机的电气接线也被浇筑在里面
（图片来源：John Fellhauer，jfellhauer@ surenergy. us）

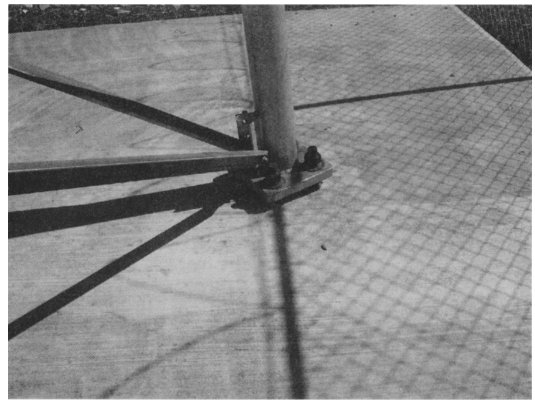


图 9-41　安放到浇筑在混凝土基座中螺栓上的桁架式塔架的支脚，一个金属模板被用来保持混凝土浇筑时的螺栓位置

9.3　塔架的攀爬

在风电场中，有时需要攀登到风力机的塔顶去工作，对叶片、发电机、齿轮箱、机舱内或机舱顶部的其他设备进行检修和维护。如果塔架是一个桁架式塔架，可以通过用安全带将自己连接到塔上的网格式框架。如果塔架是一个中型独管式塔架，这种塔架的内部通常足够大，能够配备通至塔顶的室内梯子或阶梯。在大型风力机上，可以通过梯子或电动升梯到达顶部的机舱内工作。本节主要介绍攀登到塔

顶的相关方法，介绍攀登过程中要求使用的安全带和安全设备的类型。

9.3.1 内部阶梯和梯子

图 9-42 是一个中型独管式塔架的内部构造，这张照片的视角是从塔的塔基向顶部看。从图中能够看到一个与塔壁相连接的永久性的梯子，攀爬人员可以把安全带系在梯子外缘上。图 9-43 的视角是从塔顶顺着梯子向下看，大多数攀登工具如梯子或楼梯都是位于塔内的。这些攀登工具在顶部和底部之间的不同阶段设有休息平台，这些平台能够为攀爬过程中的工作人员提供一个休息场所。在维修期间，这些平台也可以用于短时存放将从塔基运送到塔顶的工具和其他设备。

图 9-42 从塔底看上去的中型独管式塔架内部结构

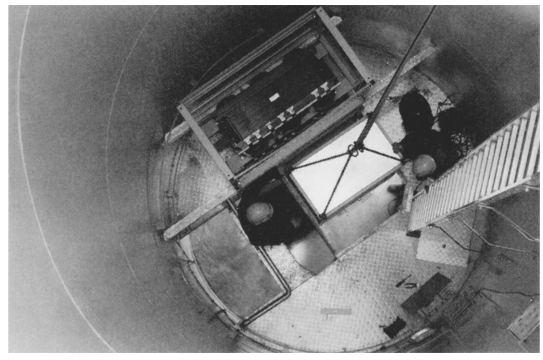


图 9-43 从塔顶看下的中型独管式塔架内部结构

对于一名即将成为风力机安装或维修人员的人，通常需要分别在风力机塔架的

内部和外部工作一段时间，以确认是否有恐高症。同时还需要练习攀爬几种不同类型的塔架，看看是否有足够的体力去攀爬塔内外的梯子或阶梯。有些人可以在塔内攀爬，但是害怕在塔外攀爬，因为人们的视野在塔内和塔外有不同的参考高度。而有些人从塔外爬上风力机的顶部没有任何问题，但从塔内攀爬时存在问题，因为塔内没有一些可见的参照物作参考。有些人从塔下向上看时害怕，而有些人从塔上向下看时感到害怕。若发现自己对高度存在心理或身体问题不必担心，因为在风电行业里还有很多不需要离开地面的工作岗位，重要的是要了解自己所从事工作类型的限制条件。

9.3.2　塔内电动升梯

一些高大的独管式风力机塔架内有电动升梯，能使工作人员很快从塔底到达塔顶的机舱。电动升梯专为一个人设计，它通过能从塔底升至塔顶的牵引绳索带动升降舱并保持其平衡。工作电梯的升降动力来源于提升电动机，它具有自动安全制动功能，能在紧急情况下停止电梯并使其保持在原位。电动升梯是除梯子或阶梯外，保证技术人员能够到达塔顶部的另一途径。

电动升梯的主要优点是适用于那些身体条件不适合爬楼梯，但又需要对发电机、齿轮箱和机舱其他部分进行检修维护的工作人员。如果这些人通过爬梯子或阶梯到达塔顶后可能就没有力气工作了。很多时候，年长的技术人员一般不在风力机的机舱工作，因为他们没有足够的体能去攀爬梯子。此时电动升梯就可以让这些比年轻人有经验和技术的老职工，安全地到达风力机顶部并在机舱内工作，而不需要花费额外的体力去爬梯子。这种电动升梯还可以使技术人员在机舱内的工作时间变长，因为他们不需要储存体力保证安全地爬下梯子。在出现电源故障时，电动升梯可以手动降至塔底。工作电梯也可为那些在风力机顶部受伤或者爬不下来的人们提供方便。

9.3.3　外置梯子和桁架式塔架的攀爬

大多数新的风力机塔架不再在外部设置梯子，因为人们发现鸟类可能会使用梯子进行筑巢。一些陈旧的塔架仍采用外部梯子抵达风力机顶部。几乎所有的水平轴风力机在机舱顶部和靠近轮毂处都有外部梯子，使工作人员能够爬出机舱或爬上轮毂，否则只能依靠技术人员的临时攀登装备。图 9-44 是技术人员攀登这种类型的梯子检查叶片和转子的现场工作情况。一些类型的水平轴风力机在机舱左右两侧都有供技术人员工作

图 9-44　技术人员利用转子外部的梯子检查叶片（图片来源：Nordex）

时站立的狭窄的工作平台，技术人员可以通过攀爬内部梯子并通过机舱两侧的门到达工作平台。图 9-45 中，两个技术人员通过内部梯子爬上塔架，并通过机舱两侧的出口到达小工作平台。

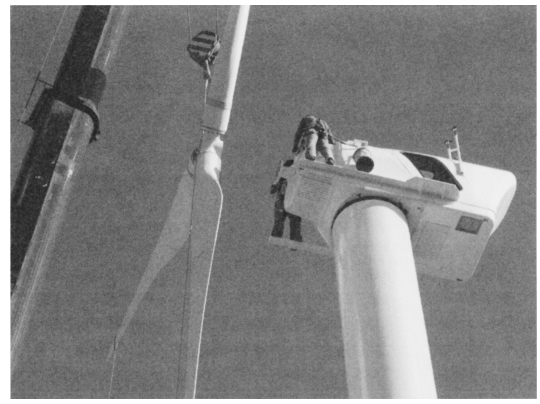


图 9-45 技术人员通过内部梯子和机舱两侧的门到达小工作平台（图片来源：Northern Power System Inc.）

目前有一些塔架设有缆绳可以作为技术人员由塔架外从塔顶降至地面的辅助逃生方法。图 9-46 中，技术人员使用风力机塔外的缆绳降至塔底。另一种确保技术人员安全到达或者离开风力机塔顶，或者在机舱内或者叶片上工作的方法是使用一个外部升降梯。如果技术人员需要完成大量的叶片工作，他们可以使用一个称为叶片维护台的特殊工作平台。这个系统使用电动升降电动机将工作平台提升到塔顶外部。叶片维修平台必须足够大，因为它要承载所有的检修设备和一个或多个技术人员，并从风力机底部到达风力机塔架顶部。这种类型的平台采用特殊的开放式设计，使叶片能够移动到工作平台中部，这样，技术人员就可以接近所有的叶片表面开展工作。图 9-47 中，技术人员在检查叶片和转子连接处的螺栓。图 9-48 中，技术人员使用叶片维护平台工作，这个平台使他们在风力机上工作的时间变长。如果需要对叶片进行维修，可将该平台停靠在正确的高度。这种类型的外部工作平台，使风力机的技术人员工作起来更安全、更舒适。

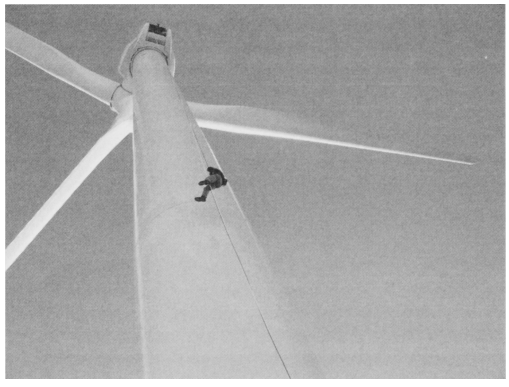


图 9-46 技术人员使用风力机塔外的缆绳爬上或爬下塔架（图片来源：美国能源部 NREL）

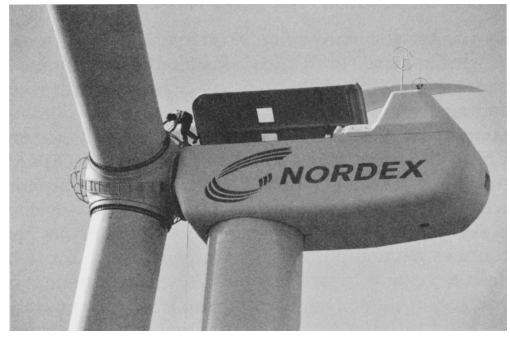


图 9-47 技术人员正在机舱外检查叶片和转子连接处的螺栓（图片来源：Nordex）

如果风力机采用桁架式塔架，技术人员就需要通过攀登塔架的外部结构进入塔顶，开展风力机或叶片的相关工作，图 9-49 就是技术人员攀登这种桁架式塔架的例子。从该图中可以看到，技术人员身上系着安全带并紧扣在塔上，桁架之间不同角度的支撑梁使攀登变得容易。如果风力过强，塔架的表面湿滑或有冰和雪，攀登这种桁架式塔架是不安全的。技术人员应在攀爬之前报告塔架的情况以确保攀爬安全。

图 9-48　技术人员在叶片维护平台上检查叶片（图片来源：Siemens Wind Energy）

图 9-49　技术人员攀爬桁架式塔架，注意技术人员身上系着安全带并紧扣在塔上（图片来源：John Fellhauer，jfellhauer@ surenergy. us）

9.4　塔架工作安全及攀爬安全

围绕着风力机的大部分工作，类似于在一个建筑工地或拥有建筑设备的现场工作，不同的是前者多数是在地面以上的高度进行。这就意味着技术人员和工程师需要攀爬到高于地面几英尺到几百英尺的地点工作。他们需要通过攀爬内部或外部塔梯，或使用升降设备到达这些高度。工作现场最需要注意的是攀爬安全，因为这是技术人员所面对的工作中最危险的部分。本节将围绕风力机的攀爬安全问题以及适用于风力机的一般安全问题进行讨论，介绍在工作中需要佩戴和使用的安全设备。本节学习内容的目的不是为能够直接去现场工作提供详细信息，相反，它仅为去现场工作之前了解必要的安全培训内容提供尽可能全面的概述。风力机公司或雇主会为所招聘的技术人员提供大部分的安全培训，包括详细的资料以及实际动手操练。

安全措施的第一步是确保工作人员必须佩有跌倒或者滑落时防止坠落的最好的安全设备，这种设备可以归类为防跌落设备。它包括一套可以使工作人员正常时能自由活动，但在滑倒或跌落时又能保护工作人员身体使伤害减到最轻的安全防护装置。这种设备并不一定能阻止坠落，但它可以保证人员坠落时不会受到严重的伤害。

在工作中同样重要的是需要一个如绳索、系索之类的后备保护系统，它能够限制人员滑倒后的跌落距离。这类设备叫作锚固装置，能将技术人员锚定在风力机较牢固的地方。

9.4.1 建设和安装风力机时的安全问题

从事风力机的相关工作时，有好几个能明显涉及安全问题的流程或阶段。例如在风力机安装时，需要面对建筑工地的施工安全问题；当风力机投入运行后，又需要面对风力机维护时的安全问题；如果风力机设备出现故障，或者必须更换设备或者进行大修时，又将面对更多的安全问题。作为一名从事风力机相关工作人员，必须意识到上述安全问题的存在。

工作时需要意识到自身周围的安全隐患，包括在建筑工地上工作的起重机，在恶劣天气条件下的施工和高空作业等。当风力机组起动和运行时，作为一名工作人员，还需要熟悉从事涉及旋转设备和高压电力工作时的安全问题。

综上所述，工作人员在工作时需要采取一些基本的安全措施。例如在塔上开展维修工作时，保证现场至少有两个及以上的人员在场。切记永远不要独自工作，以防某个工作人员陷入需要救助的境界时没人能够施加援助。需要了解当前天气情况和未来天气预报，如大风、雷雨、雪等气象条件，这些都可能影响安全状况。此外，要充分掌握为每种工作所制定的周全的安全计划，并在开始该工作流程之前演练这些计划。

9.4.2 美国和加拿大的安全标准

需要指出的是，针对具有建筑设备、起重机和风力机的工作场所有一些相关的安全标准。同时也有例如美国保险商实验室（UL）和加拿大标准协会（CSA）之类的一些组织会涉及相关安全事务。在北美 UL 和 CSA 能对设备进行测试，如果测试结果符合它们的标准就会给设备颁发准许证。欧洲、亚洲国家和澳大利亚安全机构的职责也涵盖了这些内容，可以通过浏览其网站了解所需的安全测试类型以及颁发准许证情况，切记要检查所使用设备和安全装备上有无确保已达到或超过这些组织标准的准许标签。

9.4.3 风力机安全规范

对于有关风力机建设、安装和维修的安全问题，联邦、州和地方性都具有相应的法规和规范。在美国，安全法规大部分是根据联邦职业安全及卫生管理局（OSHA）的管辖范围制定的，其他的一些条例可能是由各州的职业安全和卫生管理部门编写的。在一些大型的市、县也可能有其他的安全规定。作为风力机工作人员，需要知道不同国家对风力机有不同的规章规定，必须了解和遵守本国家或本地区的安全法规。

9.4.4 OSHA 中关于风力机塔架的工作安全规范

许多 OSHA 标准被应用到了风力机施工、安装、故障排除和维护等工作中，包括 1910.12 节的施工标准、1910.24 节的安装标准、1910.29 节的脚手架塔内的人

工梯子标准，以及 1910 节 E 部分的疏散方法，包括逃生路线、逃生计划和防火措施等。其中 1910 部分还包括与国家电气规程（NEC）中的 NFPA101-2000 部分相兼容的内容。

OSHA 涉及的其他内容还包括：1910.95 节关于工作环境噪声标准；1910 节 I 部分关于个人防护装备（PPE）、头部防护、足部防护和电气保护装置的规范；1910.145 节关于事故预防标志和标签的规范；1910.146 节关于密闭空间的规定；1910.147 节关于危险能源的禁用和控制的规定；1910 节 L 部分关于消防内容的规范；1910.180 节关于起重机的标准；1910.184 节关于吊索的规定；1910.219 节关于机械动力传输设备的规范；1910 节 P 部分关于手动便携式电动工具的规范；1910 节 Q 部分关于焊接和切割的规范；1910.269 节关于风力机电气部分的标准，包括发电、输电和配电部分。可以参考 OSHA 的网站（www.OSHA.gov）获取相关领域更多的完整信息。

现场工作的每个人员都必须接受一个被称为 OSHA 10 小时的安全培训课程。OSHA 10 小时课程包括：职业安全和卫生条例概述、通用安全和健康规定以及有关下列安全事项（设备）的相关信息：电气设备、坠落保护、电动工具、脚手架、起重机、起重设备、电梯、个人防护装备（PPE）和电梯节能设备、楼梯和梯子等设备。这些课程采用网上教学，通过笔试测试后颁发证书。也可以采用教员面对面授课的形式，通过测试来证明课程内容的掌握程度。当对风力机的工作越来越熟悉后，就会了解到更多相关的 OSHA 标准和规范。

9.4.5　ANSI/ASSE Z359 防坠落规范

美国国家标准协会（ANSI）和美国安全工程师学会（ASSE）制定了 Z359 防坠落规范。本规范涵盖了防坠落设备和坠落保护，防坠落和坠落保护是两个分别独立且不同的问题，并且相应的两类设备有很大的区别。防坠落设备包括能防止人员坠落的设备和能够制止或减缓人员坠落的装置。当人员攀爬风力机塔架时，防坠落设备将锁定工作人员，当设备连接正确情况下发生意外时它会在 6ft 内实现阻止（停止）人员继续掉落的功能。

ANSI/ASSE Z359.1 规范涵盖了人员防坠落系统、子系统和设备的安全要求。这部分标准规定了连接器、吊带、锚固连接器、能量吸收器、全身防坠落安全带、自回缩绳等设备的设计、性能、资格、标志、说明、培训、检验、使用、维护等方面的要求。

ANSI/ASSE Z359.2 涵盖了一个综合坠落保护方案的最低要求。这部分标准包括了由雇主管理的坠落保护项目的要求和准则，包括职责、培训、政策、坠落保护程序、救援程序、坠落危险的消除与控制、事故调查。

ANSI/ASSE Z359.3 涵盖了位置和位移限制系统的安全要求，这部分标准规定了位置和位移限制系统的系索、背带的设计、标志、认证、性能和试验方法等方面的要求。

9.4.6　攀爬安全设备：锁钩、系索和安全带

攀爬安全设备在保护工作人员安全中发挥着重要的作用，本节将介绍和说明这种安全设备。由金属制成的锁钩是一个简单的锁定装置，它能快速实现绳索、安全带和其他必要设备之间的连接。当风力机技术人员攀爬塔架时，需要有一个锁定装置，确保他们能够快速连接到塔架的连接点，或连接到工具箱或其他工具。有三种类型的攀爬锁钩：非锁定型、自锁型和手动锁定型，图 9-50 是一个锁定型锁钩。

非锁定型锁钩是一个通用连接器，在攀爬时通常用于连接工具或其他与安全无关的设备，或者是在攀爬时进行固定而需要时又能够快速断开的设备。例如，一些技术人员使用非锁定型锁钩将扳手或其他工具连接到安全带上，在使用时能够迅速打开锁钩取下工具，在使用完毕后又可以很快地固定在安全带上。这种非锁定型锁钩不能保证攀爬的安全。

图 9-50　锁定型锁钩，注意能在锁定装置上滑动的锁夹（图片来源：North Safety Products by Honeywell）

锁定型锁钩的使用方法与非锁定式锁钩类似，不同的是锁定型锁钩在锁扣周围有一个额外的能防止其意外脱开的套管。锁定型锁钩能够承受更大重量的负荷，一般来说，锁定型锁钩用于将攀爬人员连接到安全连接点，也可以用于将最重要的设备部件连接到系带上。

自锁型锁钩有一个可以自动关闭并锁定锁钩的扣。这种锁钩用在一些不重要的场合，但它不应用于保护人员安全或实现其他关键性的安全功能。锁钩是技术人员在攀爬时，用来快速建立安全锚固点和连接点的设备，必要时还可以允许技术人员工作时把自己安全地固定在某个位置。

还有其他一些设备用来确保风力机人员攀登塔架时的安全。最基本的设备是安全带，如图 9-51 所示。从图中可以看到，安全带完全缠绕了工作人员的身体和腿。通过调整安全带的某些点可以使佩戴者比较舒服，此外安全带也有不同的尺寸供选择。工作人员正确佩戴安全带之后，安全带要与安全锚固索或安全绳等其他安全装置相连。图 9-52 所示是技术人员在塔架上工作时，用安全带将自己固定在塔架或其他安全固定点上。在技术人员从一个点移动到另一个点的攀登过程中，安全带一定不能解开，当技术人员到达休息点或工作地点时能够快速操作。图 9-53 显示了一条减振式系索，工作人员通过它可以把身上的安全带和塔架上的固定点连接在一起。这种类型的设备能在工作人员攀爬过程中滑倒或跌落时起到保护作用。减振式系索使工作人员停止继续跌落，其减振功能保证在跌落停止时人员不会受伤。当工作人员从一个地方移动到另一个地方时，安全带解开之前减振式系索总是连接的，

它具有一定的松弛度可以使工作人员活动。一旦工作人员到达指定位置开始工作，减振式系索就会连接到一个安全的连接点。

图 9-51　技术人员攀爬塔架时用到的安全带（图片来源：North Safety Products by Honeywell）

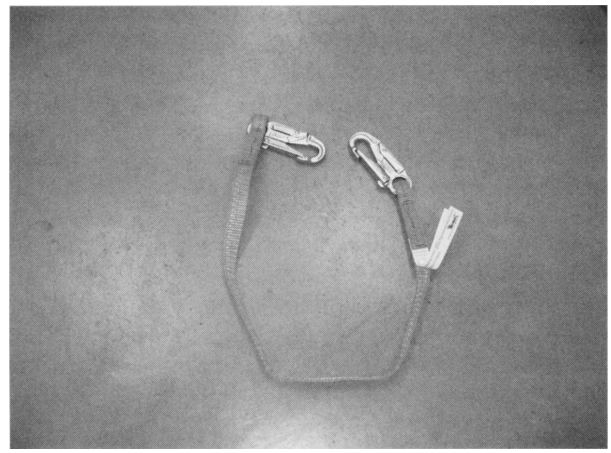


图 9-52　作为锚固装置的防止坠落安全带

图 9-53　减振式系索（图片来源：North Safety Products by Honeywell）

保障人员安全的下一步就是需要经常检查安全设备，通过周期性检修和保养来保持设备的整洁和有效。重要的一点是，在攀登前必须对所有的攀爬防护设备进行彻底的安全检查，以确保任何地方都没有损坏。攀爬防护设备也必须进行维护和清理，以确保不会磨损。如果攀爬装备发生了损坏，应立即更换新设备。最终的安全性、安全设备完整性和质量可靠性，全部依赖于工作人员自身的责任。图 9-54 是一个佩戴了安全带和其他安全装置的技术员在机舱外工作的现场图，图 9-55 为一个技术人员在攀爬塔架之前，将安全带扣到桁架式塔架上的情形。

9.4.7　救援和疏散策略

技术人员在攀爬塔架之前，需要接受一系列关于救援和疏散策略的训练课程。这些训练课程会提供一些指导，用于帮助其他可能受伤或遇到危险，以及不能安全地从塔架上下来的人员。有时攀爬装置或设备可能出现问题，导致工作人员卡在塔

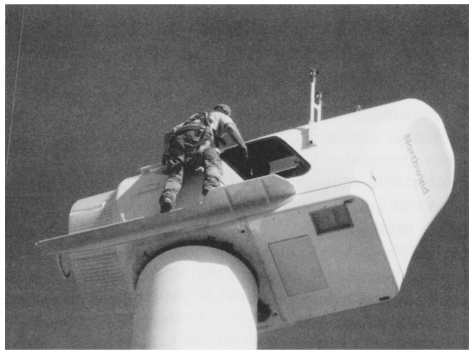


图 9-54　佩戴了安全带和其他安全装置的技术人员在机舱外工作的现场图

图 9-55　技术人员攀爬之前将安全带扣到桁架式塔架上，注意其身上的安全带（图片来源：John Fellhauer，jfellhauer@ surenergy. us）

架上。如果发生这种情况时，工作人员可以通过手势或者无线电发出救助信号，然后地面人员就会实施救援计划。

救援类型可能包括将悬在塔顶部和底部之间某个位置的人救下，另一种救援类型可能是在机械故障时保证工作人员的安全着陆。每种类型的救援都是非常复杂的，必须经过现场培训和实际动手操作，练习正确地“包裹”受伤者并使其安全着陆的技术。

技术人员要学会在随身设备损坏或丧失功能时能安全营救自己的一些技能。在训练期间要练习这些技能，同时也要受到高度严密的监督以防在训练中受伤。最后需要通过评估来确保自己能在紧急情况下迅速且有效地完成这些技能。

9.4.8　使用梯子从机舱安全疏散

技术人员需要学习的另一个重要的安全措施是在紧急情况下安全撤离机舱。当在机舱塔顶工作时忽然发生紧急情况，为了让机舱内的工作人员尽快到达地面，此时必须立即实施疏散和救援。这种紧急情况下的速度和安全都是至关重要的，例如机舱着火，需要尽快离开这个地区并快速降落到地面。此时如果有人员受伤需要帮助，就会使疏散变得更加复杂，因此必须熟悉疏散程序以便能够快速地执行。培训中会定期重复这些疏散步骤来确保熟悉程度，这样在碰到同类情况时，可以尽快无差错地执行。

9.4.9　采用自动降落设备和滑轮组救援

有数种设备是专门为从风力机塔顶部快速自动降落而特殊设计的，在使用前要先接受培训并熟悉该类设备。一些系统中这种设备可能位于塔内，而另外一些系统可能位于塔外。在攀爬的准备过程中，需要花时间认识和熟悉快速自动下降的程序，此外必要时也要对自己和同事的安全疏散和救援程序进行熟悉。

有些自动快速降落设备像滑轮组或其他类型的绳索升降系统一样简单。这些设备都有一个故障保护系统，使其在发生电源故障、发生火灾或其他类型的紧急事故时能够保持安全运行。一些较大塔架的提升电梯提供了快速降落功能，能够保证将受伤人员快速安全地带到地面。图 9-56 是一个风力机附近的升降机，在某些情况下技术人员可以用这种类型的设备从塔架顶端的机舱安全地降落到地面。

9.4.10　救援设备的检查、保养和维护

为救援设备制订一个检查、保养和维护计划是十分必要的。许多联邦和州条例规定，这些内容要安排到日常工作中，并根据安排在完成各种事项后进行记录。因为在紧急事件发生时要求快速地使用这些设备，而不会给任何警告或者时间去调整设备。因此，根据计划检修这些设备，并确保所有设备处在正常状态是十分必要的。如果发现有不符合要求的设备，应当立即确认并使其退出工作，然后用正常设备替换。在设备没有准备好或者没有人能够证明其状况的情况下，是绝不能攀爬或在高空工作的。

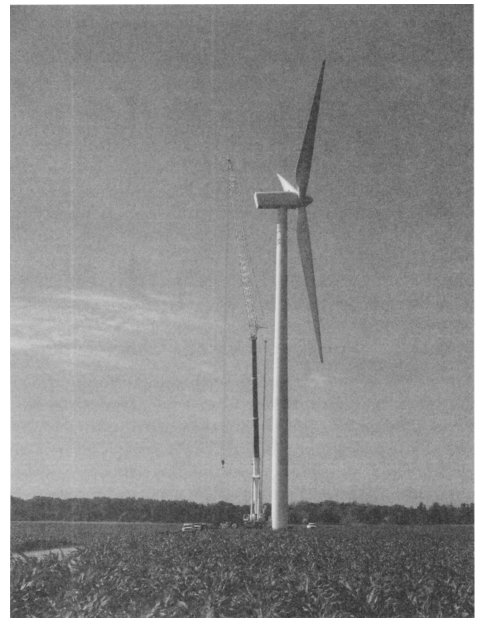


图 9-56　风力机附近的升降机，可以帮助人员在紧急情况下快速降落到地面，如果没有这样的升降机，也可以通过绳缆快速降落至地面

9.4.11　安全演习

另一项有关安全程序和设备的法规要求在日常工作中进行安全演习。能理解并正确实施安全程序对于确保紧急情况下所有人员都能够互相帮助是至关重要的。进行逼真的安全演习，可保证每个人都能掌握安全程序，并能快速高效地救人。对这些演习进行计划和评估，确保所有人员都充分了解自己的角色，并能毫无问题地执行。如果程序出现偏差或者在演练中出现问题，后续的培训就可以针对这些问题进行改正。

9.5　风力机的安全防雷

由于风力机往往是附近区域中最高的建筑物，因此会经常受到雷击。风力机塔架顶端的机舱、机舱内的发电机、从发电机连接到地面的电线以及风力机叶片都很容易受到雷击。风力机每一部分的防雷都代表着一个不同类型的风力机防雷问题。确保风力机免遭雷击的方法是制定要求叶片能承受 98% 的雷击的设计标准。

防雷保护包括适当的接地、配置接闪器和浪涌保护装置。保护风力机及其设备

的一种方法是利用大量的接闪杆和接闪器，雷电保护系统能够吸收雷击并将高电压和大电流传输到大地进行消散。

大型风力机叶片在建造时可以通过在叶尖嵌入一个接闪器（接闪杆）来保护叶片。这种类型的雷击防护可以直接把雷电引导到适当的路径，并传至接地系统。在一些大型的风力机中可能要装置多个接闪杆。由于叶片是旋转的活动部件，需要一系列集电环来转移雷击时通过叶片接闪杆传导的能量，并经由塔座的静止部分传至接地系统。

采用钢丝网可以保护机舱免受雷击，它连接到接地系统，可以实现对任何机舱雷击的分流并能将雷电的能量释放到大地。风力机上另一个容易受到雷击的部分就是控制信号线，它们分布在计算机或 PLC 和风力机各部分之间。由于这种信号线采用的电压非常低，一旦雷击产生的高压进入系统，就可能会对其造成损害。铁丝网也可以保护这些控制信号线，把雷电引起的任何寄生电压都导入大地。

如果雷电击中叶片时，其表面可能会损坏，技术人员视其损坏程度对叶片进行维修。由于叶片是由玻璃纤维复合材料或其他类似材料制成的，如果叶片损坏到无法修复的程度，那么就要将它们卸下并用新叶片代替。

9.5.1 电气安全、浪涌保护及防雷保护

发电机和并网点之间的开关设备和电气控制设备也会受到雷击或者电网过电压的破坏。如果风力机直接连接到电网，任何来自电网的高电压波动都会反馈给风力机。这种情况一般由变压器故障或寄生电压引起。

保护上述设备的一个方法是使用浪涌保护，该方法在其他电气设备的保护中也经常用到。浪涌保护将任何高于安全值的电压直接引入大地，从而消除危害。浪涌保护可以与快速熔断器结合使用，快速熔断器通过断开连接来保护设备不受损害。浪涌保护及其他类型的保护设备可以在半个正弦波周期内动作，因此不会使电压超过安全水平而破坏连接到电网的发电机和逆变器等电力设备。

9.5.2 接地

另一种保护风力发电系统的措施是提供足够大的接地系统，它由埋入在不同地区的 8ft 或更深的铜制接地棒构成。如果多个接地棒一起使用，可以通过低阻抗连接在一起，把任何雷击或接地电流传输到地下从而安全地消去隐患。

定期检测风力机接地系统，确保它可以安全地将大电流引入大地。接地系统及其导线必须用绝缘电阻表或其他类型的测量设备检测，确保接地系统阻抗是最小的，保持与大地良好的连接。绝缘电阻表是一种具有测量百万欧姆能力的欧姆表，可以检测出非常小的绝缘故障，以便在出现问题之前进行修复。

9.5.3 接地故障保护

利用接地故障保护可以保护风力机的电力电子回路。接地故障保护系统不断检查发电机发出的电流，并确保电流全部送入电网。如果电流偏离了正常流通路径，就会意味着发生了故障，接地故障保护系统就会通过熔断器或断路器断开主回路。

当系统检测到故障并且断开回路时，就会中断发电机和电网并网点之间的所有电流。这种类型的系统还可以检测出馈送给电网的不规则电压或电流。接地故障系统可精确测量发电机发出的电流，并能检测出任何进入电力系统的杂散电流或过电流，也能检测出是否有电流流入大地。一旦有上述任一种情况发生，接地故障保护就会断开主回路。通常情况下，接地故障回路由检查故障的技术人员手动复位。

9.5.4　电气元件的其他保护

由于风力机的电气系统与电网相连接，所以必须保护它免受那些常对电气设备产生危害的各类问题或故障的影响。例如风力机系统必须配有失步保护，这意味着任何时候当风力发电机发出的电压频率和相位与电网不同步时，发电机就应尽快被切除，暂时与电网解列。如果风力机发出的频率和电网频率之间的差异很小，电网频率将覆盖发电机发出的频率并迫使其与电网频率相同。如果是相位差问题，电网不能消除这种故障，发电机就要从电网解列，直到相位一致时再重新并网。

发电机还需要配备的其他保护回路包括欠电压保护、过电压保护、过频保护、低频保护以及低电压穿越保护。如果还需要了解更多相关问题，可以回顾本书第 8 章中有关风电并网的知识。

9.5.5　安全并网开关

发电机所连接的电力系统和风力机之间必须有一个专门的电气开关，用于控制发电机何时能接入电网。正如本书第 8 章中讲到的，设备连接到电网是非常重要的，而且必须在正确的时机连接到系统。安全并网开关可以确保发生故障时把发电机从电网断开，以保证发电机不受来自电网故障电压的影响。必须定期检查并网开关，以确保它们能正常工作。

9.6　超速保护和塔架过负荷控制

风力机必须在塔架内安装超速或超载保护控制系统，该系统通过传感器不断监测叶片速度并确保不会超速。在大型风力机中，可以通过调整叶片节距和机舱偏航位置确保叶片在非常高的风速下转速也不会过高。如果叶片节距和机舱偏航位置仍没有控制住叶片的转速，超速保护控制电路将启动并激活转子制动。

对于小型和中等规模的风力机，必须控制超速以防止叶片旋转过快而损坏塔架。中小型风力机的超速保护将使叶片和转子停转，直到强风停下来。一旦风速恢复到安全水平，超速保护将释放叶片并允许它们开始转动发电。实际中需要查阅每台风力机的数据，确定叶片允许的最低运转速度和最高运转速度，以及风力机允许的最低和最高风速。

9.6.1　出于安全原因的叶片机械制动

风力机需要有一套在维修时可以手动设置的工作制动装置。常规制动装置的作用是使旋转的转子停下，其后工作制动装置起作用把叶片锁定在特定位置。如果叶

片由桨距角控制，可以在使用制动装置前通过调整叶片节距减慢叶片旋转速度。图9-57中风力机叶片停靠在不能捕获风能的位置，叶片的狭窄边缘远离风向并向后对着塔架，该位置使叶片不会捕获风能而旋转，适用于当叶片必须停转进行维护的情况。在进行维护之前，叶片和发动机舱的工作制动系统必须事先设置好，并且还要使用其他类型的制动装置以确保叶片不会转动。维护结束后就可以释放制动装置，使叶片可以开始再次旋转。

9.6.2 磁力释放型叶尖制动装置

许多小型或者中型的风力机叶片上都配有叶尖制动装置或者安全制动装置。各种功率的风力机都可能会发生的一个问题是：叶片会在强风情况下超速导致叶片或塔架损坏。防止超速的一种方法就是在风力机叶片的顶端安装一个安全制动装置或叶尖制动装置。图9-58是一个叶尖制动装置，该制动装置在设计上保证在叶片转速超过最高允许数值之前，来自永久磁铁的磁场使制动机构保持在释放位置。当风速超过安全范围，叶片转速超过安全速度时，离心力将导致叶尖制动装置变为制动状态，这是因为离心力超过了磁力。当叶尖制动时会使叶片产生一个不规则形状并开始减少风能捕获，减慢叶片速度。当叶片降到一个安全的速度时，叶尖制动装置上的弹簧会使其恢复到安全位置，制动装置再次被磁铁控制。叶尖制动装置可反复使用，确保叶片不会超过其安全转速。

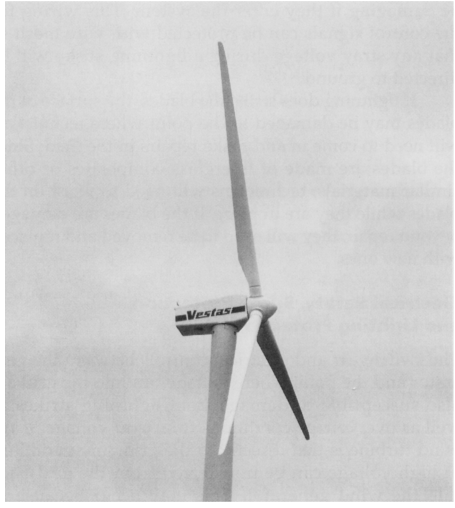


图9-57 在维护过程中风力机叶片被调整到不能旋转的位置

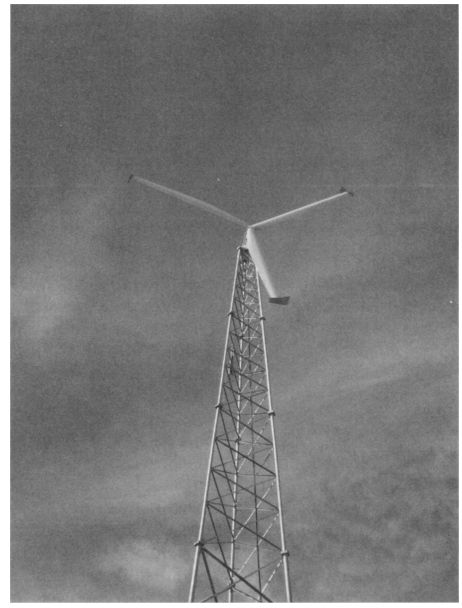


图9-58 每个叶片顶端都装有磁力叶尖制动装置，当叶片旋转过快时叶尖制动装置就会移动至使叶片变慢的位置

另一种类型的制动是在每个叶片顶端安装了一个特殊的叶尖制动机械装置，其工作方式类似于由磁铁控制的制动方式。当叶片转速低于最高安全速度时，这种制动装置保持不动，当风速超过安全速度并会对叶片造成危害时，叶尖制动机械装置就会使叶片叶尖部分旋转 90°，从而在叶片末端产生一个不规则的表面，这个不规则的表面会导致叶片释放风能并自动减慢速度。当叶片转速达到安全速度时，弹簧使叶片叶尖恢复到正常位置，叶片开始重新吸收风能并提高转速。如果风速再次超过安全速度，这种制动将再次旋转叶尖并使叶片降速。这个过程可能会反复出现，以确保叶片不会超过它们的安全运行速度。

重要的是需要定期检查叶尖制动组件以确保工作正常，还需要测试叶尖制动装置，确保它能正确工作，能在叶片高速运行时滑入相应位置。

叶尖制动装置专门作用于风力机的叶片尖端，使叶尖形状相对于叶片的其余部分发生改变，并导致转子的速度降下来。叶片的尖端可围绕其纵轴旋转约 90°，当离心力超过磁力时，叶片末端部分从其正常位置释放出来。离心力会随着叶片速度的增加而增大，当叶片旋转太快，离心力的大小超过力图使叶片处于正常“运行”状态的磁力时，会造成叶片的局部展开和叶片形状的改变，从而使叶片开始弃掉风能，其速度自然减慢下来。

如果制动系统使用一个旋转叶尖机构，当叶片速度过快使其受到上述外力时，叶尖会相对其余的叶片部分旋转。一旦叶尖开始旋转，它会导致叶片弃掉风能从而使转子转速降低，这个过程反复持续直到风速或转速减低为止。当转子转速降至安全速度时，弹簧的作用会使叶尖重新恢复原位。当机械制动装置使叶片停转时，叶尖制动机构也会复位。

另一种避免叶片捕获风能的方法是转动叶片使其处在水平方位。图 9-59 是一个单叶片风力机，通过改变叶片倾斜度使它不能捕获风能。这种措施会导致叶片节距改变从而使转子停止转动。

图 9-59　通过调整叶片节距使单叶片风力机转速降低并最终停机（图片来源：Powerhouse Wind Ltd.，www. powerhousewind. co. nz）

9.6.3　停机制动器

在风力机中，通过控制系统和制动系统共同作用使风力机的叶片停转并锁定在某一位置，这些制动器统称为停机制动器。风速低于 10mile/h 时，风力机发出的电能最少（某些风力机能够发电所需的最低风速可为 6mile/h）。当风速过低

时，叶片会停止转动，这就是所谓的“停机”。当风力机在停机状态时，它的制动系统会启动，叶片被锁定而无法转动。在风力机维护期间，也需要启动风力机的制动器，确保叶片不会转动。

当风力机上的风速仪测得的风速大于最小风速时，一个控制信号会被发往制动系统使之释放，同时叶尖制动器和动态制动系统也释放，转子开始旋转加速直至发电机转速达到1800r/min。当发电机通入励磁电流后开始产生电压，此电压可以逐渐达到电网要求的频率、相位和电压等级。当发电机输出电压与电网电压相匹配时，并网开关闭合将发电机并入电网。

如果风速超过安全速度（通常情况下指风速超过50～60mile/h）时，控制器通过给制动系统发出信号关停风力机。在一些大型的风力机中，控制系统首先会改变叶片节距以缓减转子速度，然后改变机舱的方向使叶片不再迎着风向，这样转子转速会逐渐降到安全水平而不是一味地停止叶片转动。这种速度控制既能使风力机高效运行，又能保护叶片和塔架不会工作在超速条件下。

这种控制器同样能够在风速很低的情况下保护塔架和风力机叶片，该运行情况称为欠速或低风速工况。当这种情况发生时风力机叶片被关停，直到风速再次上升到最低风速以上。

如果风力机发出的功率高于额定功率时，控制器就会发出使转子慢下来或关停风力机的命令，使发电机的发电功率逐渐减小到其额定范围内。如果长时间使用机械摩擦制动器，它就会开始过热。如果在转子速度逐渐降低的时候制动器温度过高，则需要彻底停止风力机让制动系统在再次使用前充分冷却。

9.6.4 制动系统和故障保护系统

制动系统往往是风力机故障保护系统的一部分。这里故障保护的意思是如果电气、液压和机械能量系统的任一部分失灵，故障保护系统仍然能够正常动作。在风力机完成最初设计而系统所有部分建造好之前，故障保护系统就已经设计好并被集成到许多安全系统中。在周期性维护过程中，定期测试故障保护系统是十分必要的。

9.6.5 液压制动

拥有液压系统的大型风力机，可能会配置一个液压制动装置，液压制动通过接受来自液压油的压力实现停车。在本书第5章中已经介绍过，液压系统中液压缸直径大小和液压压力大小决定了液压制动的最大作用力。液压缸必须足够大以提供足够激活制动系统的力量和能量，每当进行风力机维护时，液压制动系统都会将风力机停机并将叶片锁定在固定位置。

9.7 塔架周边的鸟类安全

旋转的风力机叶片的叶尖速度非常快，足以杀死一只轻轻接触到的小鸟。早期

的风力机往往转速较快，一些小型民用风力机的转子和叶片速度也非常快。如果鸟类进入高速旋转的风力机叶片内，风力机就可能把它们绞死。此外一些陈旧的风力机塔架外部都配有梯子，鸟类很容易在上面筑巢。当幼鸟离开巢穴时，有些就可能会飞进叶片而丢掉生命。

现在，这些问题大部分已得到解决，风力机叶片的速度已经变得很慢，通常小于 20r/min。并且风力机外部的梯子已经被移动到内部或被遮盖起来，鸟类无法轻易在塔架外筑巢。因此，死亡的鸟类数量已大为减少，但实际死亡的鸟类数量是无法记录的。

很多时候，人们不能正确地看待风力机伤害鸟类的问题。例如研究美国鸟类被杀的主要原因，就会发现看管宽松的家猫是杀死鸟类的主要原因。其他原因诸如鸟类与飞机相撞，鸟类被高速公路上的汽车和卡车撞死，鸟类被如猫头鹰和鹰类猎鸟捕食，以及恶劣天气（暴风雪和严寒天气）导致的鸟类食物减少等，所有这些因素都比风力机每年杀死的鸟的数量多。虽然由风力机导致的鸟类死亡很少，但设计者也在尽一切可能限制鸟类以塔架为栖息地，减少因风力机而造成的鸟类死亡事故的发生。

9.8　塔架维护

由于风力机塔架会受到气候因素和极端天气的影响，因此必须定期检查风力机塔架中可能会发生松动或腐蚀的零件。桁架式塔架中会有用于安装塔架的各种各样的螺栓、螺母以及紧固件，这些零件必须进行定期检查，确保不会松动或腐蚀。同样需要注意的是风力机叶片旋转时可能产生一定的振动，久而久之，这些振动可能导致某些零件或紧固件的松动。综上所述，风力机塔架必须定期安排维护，确保塔架能够长时间地保持稳定和可靠。

通过各段连接在一起的大型独管式塔架也需要定期检查，确保用于将各段紧固的螺母和螺栓仍然牢固，转矩符合要求。同样重要的是，检查独管式塔架的内外表面，确保它们没有因氧化而造成任何损害。有些塔架可能需要在外部表面涂层，以保护它们免受恶劣天气的影响。

简　答　题

1. 描述独管式风力机塔架的外形特征。
2. 描述桁架式风力机塔架的外形特征。
3. 解释什么是牵索，说明其安装方法。
4. 说明竖立风力机塔架时起重架和倾斜式塔架是如何工作的。
5. 概述竖立桁架式塔架的步骤。

6. 描述大型独管式塔架和模铸混凝土塔架是如何组装的。
7. 解释为什么起重机要比它安装的风力机高。
8. FAA 在风力机选址方面所起的作用是什么?
9. 列出技术人员在地面以上工作时所使用的安全设备。
10. 列出几种到达独管式风力机塔架顶部的方法。

选 择 题

1. 风力机外部服务平台（　　）。
a. 可以使工作人员乘电梯到达顶部
b. 可以使工作人员攀爬外部梯子到达顶部
c. 可以使技术人员攀爬内部梯子到达顶部
d. 以上所有
2. 下列哪种风力机塔架容易攀爬?（　　）
a. 垂直轴风力机塔架。
b. 桁架式风力机塔架。
c. 独管式风力机塔架。
d. 以上所有。
3. 安装风力机时，风力机高度需要通过下列那个联邦政府组织的允许?（　　）
a. EPA。
b. QSHA。
c. FAA。
d. 以上所有。
4. 在浇筑风力机塔架塔基时为什么需要模板?（　　）
a. 确保塔架基座的精确尺寸。
b. 确保塔架基座中螺栓的正确位置。
c. 确保塔架基座的厚度和塔架吻合。
d. 以上所有。
5. OSHA 准则包括（　　）。
a. 安全条款
b. 风力机高度条款
c. 环境条款
6. ANS/ASSE Z359 条款包括（　　）。
a. 环境条款
b. 鸟类保护和环境条款
c. 防坠落条款

7. 下列哪项为技术人员在风力机地面以上部分工作时使用的安全设备？（　　）
a. 全身式安全带。
b. 减振式系索。
c. 安全带。
d. 以上所有。
8. 牵索的作用是（　　）。
a. 加强塔架的稳固性
b. 帮助从发电机传输电力到达塔基
c. 加强塔架模铸混凝土的支撑力
d. 以上所有
9. 海上风力机存在的问题为（　　）。
a. 海水引起风力机塔架的腐蚀
b. 把电力传输电缆固定在海底有困难
c. 暴风可能破坏风力机塔架
d. 以上所有
10. 倾斜式塔架用到额外的起重架是（　　）。
a. 竖立起小型风力机塔架
b. 便于快速安全地从塔架上撤离
c. 使倾斜式塔架更加牢固
d. 以上所有

第 10 章　风力机设备与风电场

本章学习目标

读完本章后你将能够：

- 解释什么是承包工程。
- 风力机选址时所面临的四种问题。
- 解释小型民用风力机系统需要变流器（变换器）的原因。
- 解释风力机安装在农场的两个优点。
- 列举风力机的两种商业应用。
- 认识 2009 年美国五座最大的风电场。
- 了解 2008 年全世界总的风力发电量。
- 了解风力机安装在海上的两大优点。
- 了解欧洲两大海上风电场。
- 了解风力机安装在海上的两大缺点。

本章关键词

商业风力机（Commercial wind turbine）

电力电子逆变器（Electronic inverter）

吉瓦（Gigawatt）

兆瓦（Magawatt）

海上风电场（Offshore wind farm）

电力电子变频器（Power electronic frequency converter）

项目开发计划（Project development plan）

民用风力机（Residential wind turbine）

盐水腐蚀（Saltwater corrosion）

地下传输线（Underground transmission lines）

水下电缆（Underwater cable）

风电场（Wind farm）

风电场选址评价（Wind site assessment）

本章概述

本章首先详细介绍风力机的安装，如大型风电场、海上风电场、两台或三台风力机构成的小型风电场的安装，以及风力机在居民或商业建筑上的安装。此外，本章还介绍单台风力机的选址及大型风电场的选址问题，其中包括项目开发、风电场评估、单台风力机的选址等问题，还包括确定单台或两台风力机的最佳选址时所面临的其他问题。

最后，本章介绍了小型民用风力机、家用风力机、商用风力机以及风电场的最佳选址问题。本章列出了美国和世界上最大风电场的位置以及近期发展状况。还会

介绍临海国家发展海上风电场的过程。

10.1　项目开发

为了确定风力机的最佳选址，分析其选址所涉及的相关信息，需要制定一个项目开发计划，包括风力机和风电场的最佳位置、不同大小的风力机可用的风能资源以及电能输出区域、土地所有者协议、可能需要的电网互联和在当地控制电网的电力公司、控制国家、州、乡村或城市规划的政府机构等，并尽量使风力机满足这些计划。

许多商业公司会为项目开发做规划，但不是免费的。选择风力发电设备时，设备费一般会包括风力机的安装费在内。商业公司不直接出售风电设备，它们只是介绍一个或多个品牌，由建设公司实施并完成整个安装过程，其中一些工程属于承包计划的范畴。整个计划都要谨慎进行，最后交给业主。承包计划很昂贵，但对工程拥有者来说，整个计划的细节都要细致地完成。

10.2　风电场选址评估

风电场选址评估包括收集风向、风速、每天风吹时间以及每月风吹天数等数据，用数据报告来确定整个风电场以及不同高度的风速计和风向仪的位置。一般地，风电场选址评估可以采用全球定位系统（GPS）所提供的精确风数据信息、图片、显示周围环境的卫星图像。

大型风力机所在地的地理环境也是需要考虑的对象之一。若在土壤太软地区，或不能排水的沼泽地区，风力机塔架和机舱的大小及重量会受到限制。若靠近机场区域，或其他有高度限制的地区，风力机的高度有可能会受限制。在某些假日胜地，风力机的安装也可能会受到影响。

在一些州，为了吸引更多的风电项目，政府机构甚至会帮忙解决风电场选址评估问题。如果风力机坐落于此，该州还会提供财政支持。在安装完一台风力机后如果再安装其他风力机，则会简化风力机的选址工作。因为电网互联、电网公司联络、州政府管理状况以及其他一般信息已在前一个计划中完成，如今可直接使用。此种情况下，原始安装的信息也会随着选址不同而变化，例如，风电安装处的可用风和不同高度的可用风都会影响风力机的原始安装信息。

10.3　选址问题

风力机安装位置的选择需要注意很多问题，可以归为以下几类：环境问题、噪声问题、高度问题和电网并网问题。

环境问题是指风力机与其所在地环境之间的协调问题。假如坐落在野生动物栖息区附近的一台风力机，鸟类飞过时可能会触电。因此，此类风力机安装的要比一般风力机高。海上风电场的所在地，也要考虑避开鸟类迁移时常经过或休息的地区，以防影响它们的迁移路线，避免风力机伤害或电击它们。其他问题还包括风力机安装时公路或隧道的宽度问题。另外，还要考虑高压线和城市附近的大型输电塔对环境的影响。

第二个影响风力机选址的是视觉污染。风力机在该地区一般都是最高的建筑物，有人担心在地势低洼地区，如山口、大草原和近岸发展区等，这些高大建筑物会影响视觉。风车已在农场中存在了 150 多年，当有大型风力机坐落在农场中时，视觉污染已不再是关键问题。

第三个比较恼人的风力机选址问题是噪声。风力机中的叶片转得越快，其噪声就越大。当风力机运转在低速时，噪声问题不是很大。然而当多台风力机高速运行时，风力机带来的噪声便会影响附近居民，噪声问题便不容忽视。最近许多地区已颁布噪声限制法令，这些法令可能会影响风力机在居民区附近的选址，其中包括限制风力机到居民区的距离或限制居民区内的噪声分贝数。

风力机选址确定后，还有风力机所在地的维护，以及设备废弃后的转移问题。许多社区担心公司会遗弃旧设备并把它们留在原处，旧设备不能再使用，也不能再维修时，留在原处也变得碍眼。一些规定要求风电公司签订相关协议，并在协议中支付一定数额的押金，以防风电公司破产或放弃风力机时，将旧设备留在原地。

10.4 视觉及景观评估

风力机高达 300ft，在很远处就可看到。风力机安装在农田等很少有人往来的地区时，视觉问题不是很大。只要将风力机涂成中性色或同环境相近的颜色便可解决视觉冲击，然而，这便会为飞机和航空业带来麻烦。为了更好地被飞机和航空公司辨别，风力机又应该涂成鲜艳的颜色以便在远处或能见度低的天气中易于识别。新型风力机比原来的型号更大、高度更高，视觉问题也更加严重。

第二个视觉和景观所关心的问题是，将风力机发出的电能并入电网的大型传输塔的建设问题。有两种方式解决这个问题：第一，选择一个距离现有电力线路很近的地点作为风电场；第二种方法是尽可能多地安装地下传输电缆。地下传输线是埋在地下的电力线路，这些电力线路能把电能传到大型传输电塔所在地，而不会引起视觉问题。

第三，风力机安装者同风力机所要安装地区的居民和商人协商时，能够了解到此地居民和商业的活动情况，还可能包括风电场选址优劣的讨论。在交流中，居民还可以根据将来可能出现的问题表达自己的顾虑。

10.5　小型民用风力机

居民可以自己购买、安装小型风力发电系统，容量从 5 ~ 25kW 不等。民用风力发电系统是为家庭或建筑特别设计的。小型民用风力发电系统用于补充电网公司的电能。大多数居民用户每月耗电在 1000 ~ 2000kW · h[㊀]之间，因此该系统只能供应用户每月所需电能的一部分。

风力机所发可用电能总量依赖于风量和每天风吹时间。这种小型民用风力发电机发出的电能转换为直流电能，直流电能可储存在电池中，或经过一个逆变器转换为交流电能直接为用户供电。此种变流器又叫电力电子变频器（PEFC），它将风力机发出的不同频率的交流电转换为直流电，然后再变回 60Hz 的交流电。也可以用逆变器直接将风力机或电池中的直流电转换为 60Hz 的交流电，以使风力机直接与电网相连，或直接被用户消耗。

不同风速下，叶片转动时，风力发电机所发电能的频率经变频器后维持在 60Hz。晚上或在居民不需要电能时，风力机发出的直流电可以储存在电池中。如果发电机发出的交流电能或经过变流器输出的电能过剩，可以通过电能表计将多余的电能出售给电网。也可以先用一台大型电池储存电能，在需要的时候通过逆变器变换为 60Hz 的电力供给居民用。

图 10-1 是一台坐落在郊区的民用风力机。安装在郊区的风力机可能有高度限制，还可能有其他限制条件。风力机也可为船舶供电，还可为一些传统电网不能到达的偏远地区供电。在此类系统中，风力机和光伏电池板可以联合使用，并将所有能量储藏在大型电池中。当居民需要用电时，家里的用电回路可以通过一个连接在电池上的逆变器供电。逆变器的容量应该满足为家庭所需的所有电器供电的需要。

图 10-1　位于居民区的风力机
（风力机的高度和噪声可能会受区域影响）
（图片来源：西南风力公司）

图 10-2 是一个给偏远的居民用户供电的小型风力机。在大多数偏远地区，有区域规划和其他不太严格的规定。图 10-3 是一台坐落在农业区的风力机装置，在这里对塔的高度和噪声污染有更宽松的规定。很多州都制定了相关政策

㊀ 原文误为“1000 ~ 2000kW”，应为“1000 ~ 2000kW · h”。——译者注。

鼓励建设风电场。在农业区的风力机安装在靠近居民的地方，来自风力机的电能可以从地下输送到居民或农场区。地下电缆必须埋在地下足够深的地方，以免影响犁地或其他在地下 2 ~ 3ft 处的农民作业。某些装置可以和已安装在当地的排水道相连，在选择安装风力机和地下电缆之前，需要研究当地地图。

图 10-2　偏远地区的小型风力机
（郊区对高度和噪声的要求可能没有居民区严格）
（图片来源：西南风力公司）

图 10-3　农业区的小型风力机
（对高度和噪声几乎没有要求）
（图片来源：John Fellhauer，
jfellhauer@ surenergy. us）

10.6　自制风力机

另一种风力发电系统是小型自制风力发电系统，这类系统一般有 2.5 ~ 10kW 的输出容量。小型自制风力机系统可完全由原始的材料安装而成，例如风力机叶片通常由木头和玻璃纤维制成，或由成套的材料构成。一般将风力机叶片安装在涡轮机轴上，与塔杆相连最终完成整体组装。其他的组装和安装还包括电力线路、断路器和电气控制器。在多数情况下，单个用户不会一天 24 小时用电，此时便需要电池系统储存多余的电能。由于自制风力发电机一般没有速度控制器，所以其发出的交流电压是没有任何规律的。如果系统中含有直流发电机，叶片的速度也不需要控制，因为直流电压可直接储存到电压水平相近的电池中。直流发电机的转速可以直接控制发电机发出的电压水平。

使用电池储存直流电能时，存在两个主要问题。第一，在电池回路中需增加控制器，以防止电池充爆。如果电池的充电回路不受控制的话，风力发电机可能会在电池充满后继续充电，这种过量充电的状态会使电池毁坏。第二，风力机不运行期间，要控制电池不会因用户过分用电而使电量枯竭。风力发电机在发电时需要少量励磁电压，为了避免电池电压降低至零，电气回路控制是不可或缺的。电气开关在

电池将近枯竭时切断，并在风力机叶片再次转动时重新闭合。发电机利用电池中剩余的电力来励磁和起动。有时电池的过充控制和放电控制都被安装在电力变频器（逆变器）上。

电力变频器或逆变器能输出 60Hz 单相交流电压，并同时控制输出电压的大小。逆变器交流侧直接与用户相连，直流侧连到电池回路，在电池回路中将直流电压转换成交流电压。此类电池需要进行有效的检测和维护，以避免电池耗尽，避免过充或充电不足。

在风力机的安装过程中，从发电机到接地线的所有电力线路都要可靠地连接到电力塔杆上，以避免大风时松弛。用牵索固定电力塔杆和风力机，以避免它们在风中移动。图 10-4 是一台坐落在房子附近的小型风力机，图 10-5 是此小型风力机的近观图。图中可以看到小型风力机和其叶片，以及此装置上的所有牵索。

图 10-4　在房子附近的小型风力机
（图片来源：西南风力公司）

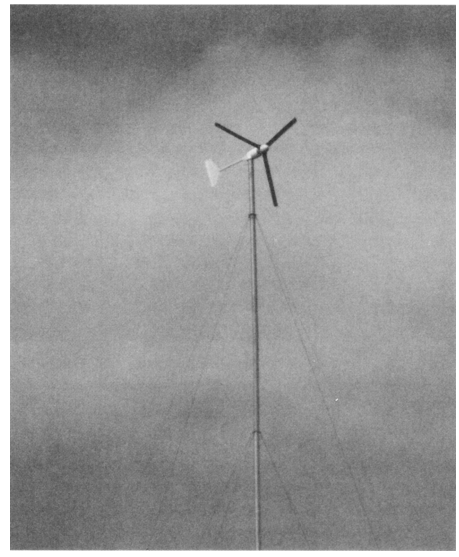


图 10-5　图 10-4 中风力机的近视图
（注意图中风力机和叶片的
尺寸，以及稳定塔的牵索）

为了使想要安装风力机的人能够在少数人的帮助下完成安装，自制风力机系统在不断地改进。这些小型风电系统能够补偿部分电费，但不能完全代替电网公司。和大型的商用风力机相比，这些小系统可能需要更多维护。也就是说，安装这种系统的人最好能够自己维护，或有人愿意（免费）维护系统运行。如果风力系统需要花钱维护，其花销一般要比从电费中节省的费用还要大。评估安装和运行一台小型自制风电系统的可行性和费用时，也要考虑所有预计的费用。

10.7　商用风力机

商业区一般安装 10～100kW 的中小型风力发电系统。商用风力机一般应用在有风的商业区或小工业区，风力机发出电能可直接补偿用户从电网公司购买的电能，还可以将多余的电能出售给电网。在中小型商业区周围的空地安装风力机，用风力机发出的电能来补偿商业区从电力公司购买的电能。一般，这类中等规模的风力机同时与电网相连，并用电能表计将风力机所有者发出的多余电能出售给电网公司。商业用户在一天中所用电量不同，当风力强时，风力机发出多余的电能，并将其卖回电网。图 10-6 是安装在一台海上商业与服务设施中的风力机。这种风力机可在夏季的数月内良好地完成发电工作，商业设备每天需要供电近 12h，所有在夜间发出的过量电能都将出售给电网。在冬天，用电量较低时，风力机发出的电能也可以用于电加热设备供房子取暖，或给其他形式的加热源供电。当然如果天然气比较便宜，还可以将电能卖回给电力公司。任何接入电网的风力发电系统都需要断路器和变压器，以确保系统的接入满足并网标准。

图 10-6　海上商业与服务设施内安装的风力机

图 10-7 所示的风力发电机起初只为小型商业建筑物供电。该风力机发出的电能可以供建筑照明和空调器使用，风力机发出的过量电能都可以送回电网出售给电网公司。使用风力机发电的另一个好处是，和其他发电设备相比，风力机在商业应用中属于“绿色”或环保性能源。一般地，此类风力发电系统都由有环保和能源理念的公司安装，这些理念可使公司使用可行技术来限制污染，保护环境。

图 10-7　安装在小型建筑物中为小型工业区供电的风力发电机（它起初只有办公室大小）

图 10-8 是一台铁路调车场的风力机。这类风力机可以为站场内的所有操作灯具供电，一天工作

24h，一周工作 7 天。该类风力机适合于铁路调车场应用，在铁路调车场内几乎全年全天的负荷都是稳定的。设计风力机的容量时可以比实际需求略小。具体设计时，可以以月负荷为基础，依据风力机补偿电量来设计。这样的风力机由电工和其他在铁路调车场工作的人员维护，在风力机安装时可培训他们做主要工作。在铁路上，用于拉动火车的是大型柴油机，一般地，柴油机也是驱动发电机的常见动力源，因此工作人员对发电机及其控制都很熟悉。

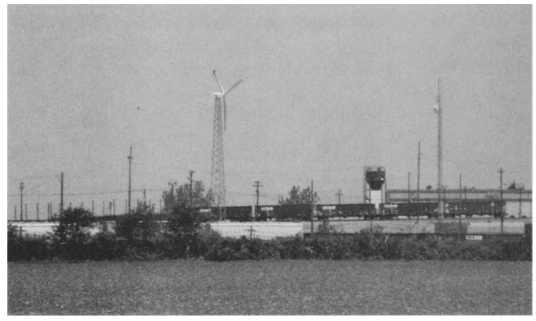


图 10-8　在铁路调车场安装的风力发电机

10.8　风电场

下面讨论将更多风力机集中安装在同一地点的情况，即风电场。一座风电场是由两台或更多风力机构成的风力机集合。有些大型风电场由 100 多台风力机构成，有些风电场由几百台风力机构成，所有风力机都可共享同电网的连接线路、变压器以及维护设备等资源。

将风力机放在一起构成风电场的优点诸多。其一是简化了与电网的连接，另外还可以同时维护所有风电机组。用大型起重机将机舱和叶片输送到适当位置时，只需付一次费，如多次用起重机将风力机运到其位置，其花销占据过半维护费。大量风力机靠近安装时，可购买或租用起重机，放置在适当位置，避免起重机在风力机之间远距离移动。此外，还可以聘用专职维护人员，全年工作于风电场。只有两台或三台风力机的小型风电场，维护风电场的设备一般是租借的，做维护工作的人员也是临时的。

风电场的第二个优点是它比另外单独安装风力机更便宜，因为大量初期工作已经完成。若某一地区对风力机的安装有限令，且限令针对该地区的所有风力机，那么在同一地点商谈多台风力机的安装，要比在不同地点商谈更容易，尤其是在跨州、跨村或跨越其他地区的商谈，更为困难。一般地，关于视觉污染的抱怨会降到最低，因为风电场可以为本地区纳税，并提供多余电能，这正是大多数工业区和州所寻求的，也是它们支持风力机入驻的原因。风电场可以建设在闲置的土地上，因

此如果有土地不能用作其他用途时，可以用来建设风电场发电。

风电场装机容量不断增大是其发展的新趋势，大型风电场所发电能接近小型火力发电厂。风电场所发电能能够满足用户需求时，便不再需要增加其他的发电设备。在美国一些大型电力设备供应商，如 BP、通用电气和西门子，都加入了大型风电项目的浪潮。美国其他能源和电力公司也在规划大型风电场项目，包括海上风电。表 10-1 列出 2008 年美国最大的 11 座风电场。表中大量的风电场项目将在近期完成，有的项目处于在建状态。从表中可以看到，早期的大多数风电场主要坐落在德克萨斯州和加利福尼亚州，然而如今它们已遍及各州。只要风力资源能够常年满足风力机的需求，便可安装风力发电机组。

表 10-1　2008 年全美大型风电场

风电场	所在州	容量/kW	状态
克朗代克风电场	俄勒冈州	400	完成
孤星风电场	德克萨斯州	400	完成
皮茨风电场	科罗拉多州	400	完成
斯维特沃特风电场	德克萨斯州	585	在建
圣乔诺风电场	加利福尼亚州	619	完成
摩羯岭风电场	德克萨斯州	662	完成
蒂哈查皮风电场	加利福尼亚州	685	完成
马谷风能中心	德克萨斯州	736	完成
福勒山风电场	印第安纳州	750	完成
舍宾罗风电场	德克萨斯州	750	在建
罗斯科风电场	德克萨斯州	781	在建

图 10-9 给出了从 1981～2008 年的美国风电发展情况。图的左边是风电装机容量，单位是兆瓦，1MW = 1000000W。从图中可以看到，2008 年全美国风电装机容量达 25000MW，由风力机发出的电能在 2000 年以后以惊人的速度增长。风力机发出的电能以此种速度迅猛增长，一方面归因于政府的激励措施，另一方面归因于风力机效率的提高。风电补充了由煤、核能或石油发出的电能，因此减缓了常规发电设备的安装。政府激励增加，风力机效率提高时，风电的单位电价也随之降低。目前，风力机发出电能的成本要比煤、核能和水力设备发出电能的成本贵很多，然而为风力机投资的一个主要原因是其环境污染很少，并且使用的能源——风能也不需要从国外进口。

在美国和全世界范围内，从 1996～2008 年由风力机发出的电量稳定上升，尤其是 2000 年以后，风电装机容量急剧上升。如今全世界的风力发电机容量已经超过了 120000MW。

另一种观察风力机发电量增长的方式是比较各国风电装机总量。2008 年，风电装机最多的国家有（由多到少的顺序）：美国、德国、西班牙、中国、印度、意大利、法

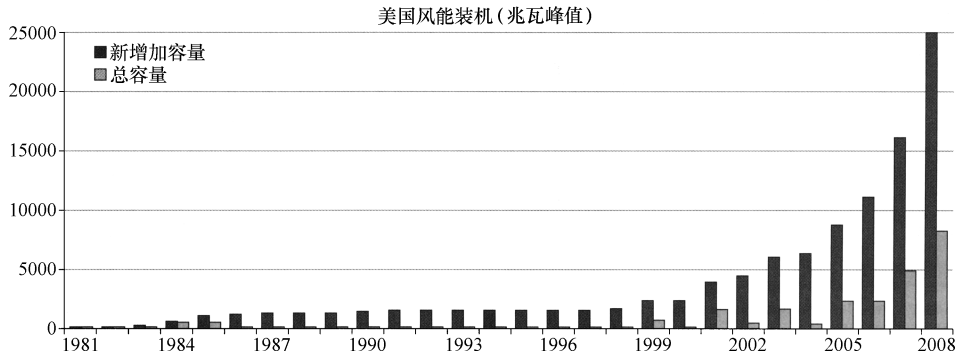


图 10-9　美国风力发电装机容量发展情况

(图片来源：美国能源部)

国、英国和日本。另一方面，以上所有国家都有许多风电项目正在建设中，风力发电装机容量也在不断地增加。而且，各个国家在排名中的位置也在频繁地变化。

例如，2005 年，德国位于风力机发电者之首，之后是西班牙、美国、印度、法国、英国、中国、法国、意大利和日本。2005 年，德国风力机发电量是西班牙的两倍。2005 年以后，美国的风力发电产量和风力发电装机容量翻了一倍多，达到 25000MW。

10.8.1　小型社区风电场项目

许多社区跨越多个电网公司，并可选择购买电能的电网公司。在这样的社区，另一种选择是安装风力机或将土地租给计划安装风力机的公司，以便风力发电机发出的电能可以补偿从电网购买的电能。如果风力机发出的电能比消耗电能的多，还可以出售给电网，以补偿社区用户用电高峰期从电网购买的电能。图 10-10 是此类风电装置的一个例子。图中显示了 4 台 1.8MW 在俄亥俄州的 Bowling Green 电力公司实际安装的风力机。Bowling Green 电力公司属于俄亥俄州电力系统的一部分，是一个区域社区的合作联网公司。这些社区联合起来发出电能，并以最低的价格购买电网电能。风力机每年发出将近 720000kW·h 的电能，足够为将近 3000 户居民

图 10-10　在俄亥俄州的 Bowling Green 电力公司的小型风电场中的 4 台风力机

供电。风力机坐落农村垃圾站附近，或以农业为主的地区，离城市大约 6mile 远，4 台风力机都有 391ft 高。

10.8.2　中等规模风电场项目

美国的很多偏远农村经常刮大风，适合建设中等规模的风电场项目。很多这样的风电场建设在明尼苏达州、爱荷华州、内布拉斯加州，因为这些地区以农业为主，远离城市，许多大规模风力机也可安装于此。此类偏远地区不需要大量电能，因此风力发电机发出的大部分电能送到电网，分配到远处的城市中去。图 10-11 是一台中等规模风电场的风力机。

10.8.3　大规模风电场项目

下面将仔细介绍美国的一些大规模风电场，包括这些风电场的位置和发展历程。此外，还会详细地介绍美国风电场的建设方式，及风电场容量的增长速度。可以结合表 10-1 了解所有电场的位置和容量。

图 10-11　中等规模风电场
（图片来源：EWT 国际）

1. 俄勒冈州的克朗代克河风电场

克朗代克河风电场坐落在俄勒冈州的威伯科东部，在俄勒冈州的波特兰以东 110mile 处。此风电场于 2001 年开始并网运行，当时由 16 台风力机构成，装机容量为 24MW。第二期风电场项目在 2005 年并网，增加了 50 台风力机，2005 年，此风电场中风力发电机的总容量上升到 99MW，足以为 25000 户家庭供电。在第三期风电场项目中，风力机数增加为 122 台，装机容量为 211MW，此阶段于 2007 年完成。克朗代克河风电场是目前美国西北部最大的风电场。

2. 德克萨斯州的孤星Ⅰ&Ⅱ号风电场

孤星风电场坐落在德克萨斯州的斯坦克尔伯格和卡拉汉，在德克萨斯州的阿比勒纳北部。此风电场由两个独立的被称为孤星Ⅰ和孤星Ⅱ的风电场构成，占地约 36000acre（1acre = 4046.856m^2）。孤星Ⅰ在 2007 年 11 月投入使用，有 88 台 Gamesa G832.0-MW 风力机和 12 台 Gamesa G872.0-MW 风力机。孤星Ⅰ的装机容量是 200MW，可以为 60000 户家庭供电。项目第二阶段——孤星Ⅱ有 100 台 Gamesa 的 G872.0-MW 风力机构成，装机容量为 200MW，在 2008 年并网运行。图 10-12 是孤星Ⅰ&Ⅱ号风电场。

3. 科罗拉多州的皮茨风电场

皮茨风电场又叫皮茨风能中心，位于科罗拉多州的东北部，坐落在科罗拉多州的皮茨，是一个 400MW 级的风电场。皮茨在科罗拉多州的丹芙东北部 150mile 处。

图 10-12　坐落在德克萨斯州的阿比勒纳北部的坦克尔伯格和卡拉汉的孤星Ⅰ&Ⅱ号风电场
（图片来源：孤星风电场）

此风电场使用了 267 台普通风力机，装机容量为 400MW，可供将近 120000 户家庭使用。

皮茨风能中心坐落在科罗拉多州的东部平原，是美国最适合安装风力机的地方，被称为风能的故乡。皮茨风电场项目分三个阶段完成，最后一阶段于 2007 年完成。此项目有一条长达 78ft 的电力传输线同电网相连。第三阶段的最新风力机有叶片长达 80ft 的 1.5MW 和叶片长达 90ft 的 2.3MW 两种机型。

4. 德克萨斯州的斯维特沃特风电场

斯维特沃特风电场坐落在诺兰乡村，在德克萨斯州的阿比勒纳以西 40mile 的地方。斯维特沃特风电场距离州际高速公路只有 20mile。斯维特沃特风电场容量达 585MW，分 5 个阶段完成。风电场的第四个阶段包括 135 台三菱公司的 1.0MW 风力机和 46 台西门子公司的 2.3MW 风力机。项目建设的第五个阶段包括 46 台西门子公司的 2.3MW 风力机。第五个阶段另外增加了 80MW 的风电装机，2007 年完成并全部投入使用。图 10-13 为斯维特

图 10-13　坐落在德克萨斯州西部阿比勒纳的诺兰乡村的斯维特沃特风电场
（图片来源：iStockphoto.com）

沃特风电场中的风力机。

5. 加利福尼亚州的圣乔诺风电场

圣乔诺风电场坐落在加利福尼亚州白水附近的圣乔诺山口东部斜坡上。白水在加利福尼亚州的滨河区东部，此地是加利福尼亚州南部风力最强的地区，距离考契拉山谷很近。另外两个大型风电场，阿尔塔蒙特山口风电场和蒂哈查皮风电场，也坐落在这一地区。2008 年 1 月，圣乔诺风电场由 3218 台风力机组成 615MW 级的风电场。加利福尼亚州的白水位于滨河区东部，是个很大的城市。

6. 德克萨斯州的摩羯岭风电场

摩羯岭风电场是一个 662.5MW 级风电场，坐落在德克萨斯州的斯特林和科克乡村。斯特林和科克乡村在德克萨斯州的阿比勒纳西北部大约 100mile 处，风电场坐落在州际公路以北 20mile 处，由 342 台普通风力机构成，每台容量为 1.5MW，还有 65 台西门子风力机，每台容量为 2.3MW。此风电场的风力机所发电能，可供 220000 多户家庭使用。图 10-14 是摩羯岭风电场中的风力机。

图 10-14　摩羯岭风电场中的风力机
摩羯岭风电场坐落在德克萨斯州的斯特林和科克乡村，阿比勒纳西北部大约 100mile 处，州际公路以北 20mile 处
（图片来源：Thinkstock）

7. 加利福尼亚州的蒂哈查皮风电场

蒂哈查皮风电场坐落在蒂哈查皮山口的东部和南部，是加利福尼亚州最大的风电场之一。风电场坐落在加利福尼亚州的贝克菲尔德东部，离高速公路只有 58mile。早在 20 世纪 80 年代早期就有风力机安装在此处，起初所用风力机是当时最大的，但如今相对此风电场的新型风力机而言，当时风力机还是太小。蒂哈查皮风电场有大约 5000 台风力机，其风力机的数量位于全世界风电场的第二位。此风电场可输出电能 8000000000kW·h，可供 350000 个用户一年使用。图 10-15 为蒂哈查皮风电场中的风力机。

8. 德克萨斯州的马谷风能中心

马谷风能中心坐落在德克萨斯州的泰勒和诺兰县，位于德克萨斯州的阿比勒纳西南部，其容量达到 735.35MW，由 291 台通用电气 1.5MW 风力机和 130 台西门子 2.3MW 风力机构成，分布在 47000 个地区。马谷风能中心的第一阶段在 2005 年底完成，装机容量为 213MW。风电场的第二阶段装机容量为 223.5MW，在 2006 年的夏季并网。第三阶段装机容量为 299MW，在 2006 年末实现并网。图 10-16 是德克萨斯州的马谷风能中心的风力机。

图 10-15　蒂哈查皮风电场坐落在蒂哈查皮山口的东部和南部，是加利福尼亚州最大的风电场之一，风电场坐落在加利福尼亚州的贝克菲尔德的东部
（图片来源：iStockphoto.com）

图 10-16　坐落在德克萨斯州西部中心阿比勒纳西南部的马谷风能中心
（图片来源：Thikstock）

9. 印第安纳的福勒山风电场

福勒山风电场坐落在印第安纳的本顿乡村，装机容量为 750MW，分两个阶段建设。本顿乡村在印第安纳波利斯西北部，管辖区同 BP 能源（舍宾罗风电场）公司有 650MW 的合作关系，BP 能源公司自己保留了 100MW 的所有权。第一阶段的总容量是 400MW，在 2008 年末并网。第一阶段由 222 台风力机构成，其中有 182 台 Vestas 的 V82，每台容量为 1.65MW 和 40 台 Clipper 公司的 C-96 至风力机，每台容量为 2.5MW。

第二阶段，福勒山风电场Ⅱ，有 350MW 发电容量。2009 年早期开始建设，预

计2010年春天并网。第二阶段风电场将使用133台容量为1.5MW的通用SLE。图10-17是福勒山风电场Ⅱ中的风力机。

10. 德克萨斯州的舍宾罗风电场

舍宾罗风电场坐落在德克萨斯州西部的佩科斯村，在德克萨斯州的福特斯托克顿东部大约40mile处。风电场的第一阶段有50台Vestas V-90至风力发电机，每台容量为3MW，风电场容量达150MW。当第二阶段完成时，计划容量可达750MW，发出的电能可供美国将近225000户家庭用电。图10-18是德克萨斯州的舍宾罗风电场中的风力机。

11. 德克萨斯州的罗斯科风电场

罗斯科风电场坐落在德克萨斯州的罗斯科，是德克萨斯州的诺兰县的一个小城市，在德克萨斯州的蜜水西部9mile处，德克萨斯州的阿比勒纳西部50mile处。风电场分三阶段完成，是世界上最大的风电场之一，有627台风力机，总容量达781.5MW。风电场的第一阶段和第二阶段于2008年并网，装机容量为335.5MW。

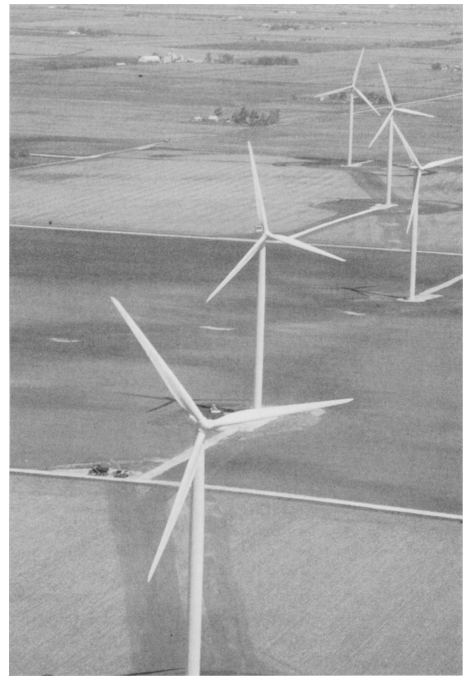


图10-17 在印第安纳的本顿乡村的福勒山风电场，本顿乡村位于印第安纳波利斯的西北部90mile处
（图片来源：BP p. l. c.）

图10-18 坐落在德克萨斯州西部佩克斯村的舍宾罗风电场，位于福特斯托克东部40mile处
（图片来源：维斯塔斯公司）

第三阶段和第四阶段预期于 2009 年底并网，此时，罗斯科风电场的总容量将上升到 781.5MW，成为美国最大的风电场。相比较，在美国，罗斯科风电场的 627 台风力发电机发出的电能将略小于小型核电厂发出的电能。781.5MW 的装机容量足以给 250000 多个用户供电。

10.9　美国海上风电

海上风电场坐落在远离海岸线的湖、河、海洋等水域中。美国最大的海上风电场位于离德克萨斯州的南牧师岛 10mile 远的海湾滨海地区，装有 500ft 高的风力机。南牧师岛大约位于德克萨斯州布朗斯维尔以北 25mile 处，风力机安装在此地没有视觉污染，此处多年来便有开采石油的装备。风力机离岸有 10mile 远，因此在岸上看不到风力机，噪声问题也不复存在。风电场建设在遥远的海上，最大问题是将电能传输到岸边时水下电缆的安装。海上风电场离岸越远，需要的电缆就越长，电压降落越大，电能损耗也增大。水下电缆是放在水面以下的电缆，通常沿着海洋或湖泊的底部布放。

离岸越远的地方，风力越大越稳定，每天持续的时间也越长。在马萨诸塞州的玛撒葡萄园的东海和夏威夷附近的太平洋地区，已经完成了建设海上风电的前期调研工作。但由于担心改变或破坏美丽的海景，该区可能要多年后才发展风电。

在莫斯科海峡安装风力机所面临的问题是，该区容易受飓风和强烈的热带暴风雨的袭击，恶劣天气的持续时间也比较长，即使是 80mile/h 的小飓风也会严重损坏风力机。目前正在探索更多的新型风电技术，其中包括可以移动的浮式平台，以及可收缩的叶片，强风来临时，将叶片收缩，只留风塔的轮廓暴露在风中。

另一个可以考虑安装风力机的地方是大西洋，大西洋上的风要比附近陆地上的风大很多。从大西洋吹来的风为风力机提供了很好的风能。风力机放在淡水区比咸水区更佳，原因是淡水区的腐蚀问题较少。咸水腐蚀指由盐的化学成分引起的腐蚀，如果金属表面没有经过刷漆等处理，咸水中的盐就会腐蚀金属，使其迅速生锈。在淡水地区也存在腐蚀问题，水不断地冲刷暴露在水中的没有受到保护也没涂漆的风塔金属部分，从而引起腐蚀。在伊利湖和安大略湖安装风电，是因为这两个湖水深较浅——其水深不到 30ft，而且湖底部的土壤足以支持大型风塔。此优势至关重要，因为若在很深的大洋安装风力机，风力机塔架可能要经过 50ft 才能抵达大洋底部。

10.10　欧洲大型海上风电场

英国（英格兰和苏格兰）、丹麦、德国早已拥有已持续发电 20 多年的大型海上风电场。不断更新，不断增大的风电场仍在建设，海上风电场为这些国家提供了

大量电能。本节将介绍更多关于海上风电场的信息。

海上风电场一般坐落在距离陆地至少 10km（6mile）或更远的地方。在欧洲，海上风电场比陆上风电场有更多的优点。例如，风力机建在海上，所产生的视觉冲击比陆地上的风力机产生的视觉冲击小，对风力发电系统的尺寸及噪声的限制也会随着其到海岸线距离的增加而逐渐放松。海上的平均风速通常比陆地上高，持续时间也较长，海中的风力机漂浮或固定在深海海底。海上风电设备一般比陆上风电设备昂贵，海上风力机的塔架也比岸上高，这是因为海上不像岸上那样有高度限制。海上风力机发出的电能要经过水下电缆传输，如果风力机距离海岸线很远，一般都采用高压直流输电。咸水会腐蚀海上变电站设备，电力塔架的腐蚀及不断的焊接，都会增加维护费用。海上风力机的修理和维护通常比陆上风力机更贵，因此海上风电场要安装最大型风力机，用尽可能少的风力机发出尽可能多的电能。

同陆上风力机相比，海上风力机的另一个优点是，海上风力机的塔架、机舱和叶片不受尺寸限制。陆上风力机在输送时采用大卡车，卡车经常要通过欧洲的窄路，因此要限制风力机设备的尺寸。风力机坐落在海上时，其尺寸只受输送它的出海轮船或驳船大小的限制。

一直到 2008 年，由于北海或波罗的海丰富的风力资源以及地势浅滩的水域优势，欧洲在海上风电方面引领着全世界。丹麦建设了世界上第一座海上风电场，并多年来都是世界海上风电场的先锋。近期，2008 年底，英国取得了海上风电场的引导地位。

2009 年，第一台漂浮式风力机安装在斯塔万格海水深 200 多米的地方。风力机安置在 120 多米高的风塔上，每台容量为 2.3MW。

以下将详细介绍关于这些海上风电场的信息。

10.10.1 英国的林恩和内道辛风电场

林恩和内道辛风电场坐落在英国林肯海岸线的浅水域。风电场由 54 台西门子 3.6MW 风力机构成，发电总容量可达 194MW。风力机发出的电能经过海下电缆传输到海岸线上。电能到达岸边后，由架空电缆传输到在斯该格里斯的米德尔马契的一个新建变电站。

这个风电场的风力机坐落在 59ft 深的水中，风塔中的管子埋在海床底下 80ft 深的地方，风力机其余设备分成两部分

图 10-19 英格兰的 Burbo Bay 海上风电场
（图片来源：西门子风能）

安装到塔架基础上。图 10-19 是林恩和内道辛风电场的风力机。

为了打造世界上最大的海上风电场，英国还于 2009 年开始建造了位于泰晤士河口的由 341 台风力机组成的巨型风电场。等到此风电场竣工时，装机容量为 1GW，即 1000000000W（10 亿 W），即 1000MW 或 1 百万 kW。

图 10-20　坐落在丹麦捞兰德附近的尼斯塔德风力机（图片来源：西门子风能）

10.10.2　丹麦的尼斯塔德风电场

尼斯塔德风电场是丹麦-瑞典风电场的一部分，于 2003 年在丹麦的捞兰德附近开始建设，由 72 台西门子风力机构成，每台容量为 2.3MW。这 72 台风力机有 166MW 的总装机容量。捞兰德是丹麦第四大岛，位于波罗地海上。图 10-20 是尼斯塔德风电场的风力机。在该风电场工作的人员均乘船进出。

简　答　题

1. 什么是承包项目？
2. 在选择风力机的位置时可能会面临的四种选址问题是什么？
3. 解释小型民用风力发电系统需要变频器（变换器）的原因。
4. 列出风力机坐落在农场的两个优点。
5. 列举风力机的两种商业应用。
6. 了解 2009 年美国最大的五座风电场。
7. 了解 2008 年全世界风力机的总发电量。
8. 列出风力机坐落在海上的两大优点。
9. 了解欧洲两大海上风电场。
10. 说出风力机坐落在海上的两大缺点。

选　择　题

1. 四种选址问题有（　　）。

a. 环境问题、噪声问题、重量问题和连接问题
b. 环境问题、时间问题、噪声问题和高度问题
c. 环境问题、高度问题、连接问题和规划问题

d. 以上全是

2. 小型民用系统在以下哪种情况下需要变换器？（　　）

a. 风力发电机给家里的电池充电，但家里所有的负荷都要求交流电压。

b. 风力发电机发出直流电压，需要把这种直流电压变换成交流电压。

c. 风力机叶片的速度通常是不可控的，这将使得发电机以任意速度旋转；交换器可以控制输出交流电压的频率。

d. 以上全对。

3. 到 2009 年美国最大的三座风电场是（　　）。

a. 空马风能中心、罗斯科风电场和福勒山风电场

b. 罗斯科风电场、歇尔布诺风电场和福勒山风电场

c. 歇尔布诺风电场、罗斯科风电场和蒂哈查皮坳风电场

d. 以上全是

4. 美国将建的最大的风电场在哪里？（　　）

a. 大西洋远海岸。

b. 墨西哥湾的远海岸。

c. 太平洋的远海岸。

d. 以上全是。

5. 海上风电场的最大优点有（　　）。

a. 风力机的塔架可以高一些，因为这里没有高度的限制

b. 风力机可以用更大的叶片，因为可以用驳船将风力机拆开后，分部分地运到目的地，而且这里没有窄路的限制

c. 坐落在咸水中，风力机不会被严重腐蚀

d. 以上全对

e. 只有 a 和 b 对

6. 在 2009 年，世界上最大的风电场计划建在哪里？（　　）

a. 英国的远海岸。

b. 瑞士的远海岸。

c. 德国的远海岸。

d. 日本的远海岸。

7. 美国的中西部的那个州有最大的风电场？（　　）

a. 渥太华州。

b. 印第安纳州。

c. 伊利诺斯州。

d. 密歇根州。

8. 电能是怎样从海上风电场传输到海岸的？（　　）

a. 通过海下电缆。

b. 通过地下电缆。
c. 通过在海平面上的固定的传输塔上的大型架空线传输。
d. 通过驳船上的大型变压器。
9. 美国前十个最大的风电场主要坐落在哪个州？（　　）
a. 德克萨斯州。
b. 加利福尼亚州。
c. 印第安纳州。
d. 科罗拉多州。
10. 在风电场选址时，决定风力机的准确位置的装备是什么？（　　）
a. 一张城市或乡村的地图。
b. 一个指南针。
c. 一个 GSP（全球定位系统）单元。
d. 以上全要。

第 11 章　风电机组的安装、故障诊断与维修

本章学习目标

读完本章后你将能够：

- 解释故障诊断的基本原理。
- 解释症状和问题之间的区别。
- 开发对电路中电压损失进行定位的流程。
- 了解风力机的故障诊断过程。
- 诊断风力机的电气、液压和机械系统故障。
- 对风力机的电气、液压和机械系统进行周期性维护。
- 了解安装风力机的步骤。
- 了解风力机的起动过程。

本章关键词

连续性测试（Continuity test）　　场地准备（Site preparation）
绝缘电阻表（Megger）　　症状（Symptom）
检修（Overhaul）　　故障诊断（Troubleshooting）
周期性维护（Periodic maintenance）　　故障诊断矩阵（Troubleshooting matrix）
问题（Problem）

本章概述

本章提供了有关风力机安装和故障诊断的相关内容。首先，介绍了风力机安装的知识，包括安装风力机和塔架的步骤。其次，介绍了各个系统故障诊断的基本步骤。基于风力机制造商提供的表格和矩阵，可对风力机或任何子系统进行故障诊断。最后，本章指出，故障诊断的主要内容之一是学习如何分辨症状和问题。很多时候，技术人员完成了症状的故障诊断，却没有找到解决问题的根源。

本章为风力发电机组的每个子系统都提供了详细的故障诊断方法，包括叶片、齿轮箱或传动装置以及发电机，并且提供了对机舱内、地面配电柜内和其他开关设备的电气问题进行诊断的知识，以及从发电机、配电电缆乃至电网的电气问题诊断方法。介绍了解决液压系统、控制桨叶节距的机械系统、制动系统以及其他机械系统和塔架的问题的方法。

本章最后介绍了风力机的周期性维护和大修。学完本章，将对风力机的故障诊断和维修知识有较深入的理解。

11.1　风力机的安装步骤

风力机的安装包括以下步骤。首先，整个过程起始于客户对开发风电表现出兴趣。这将使得客户开始关心将风力机安装在现场所涉及的一系列事项，并开始首次会谈。其次，客户关心的是初始成本和持续运营及维修费用，以及以拨款或抵销形式由联邦政府、国家或当地政府提供的补贴。客户还想取得风力机机组运行及功能的基本信息。在这个过程中，客户的最终目的是：简单地为一个对象供电，如家庭或行业，或为一个并网系统供电。

下一步是确定拟安装风力机位置的可用风量。该信息能够确定提供所需电量的风力发电机组容量，以及估计风力机每日或每年发电量。这些工作完成后，将能向客户展示符合要求的一台或多台风力机，并能够算出整个系统的成本，以及从安装工作完成到发电机开始发电的初步时间表。

一旦签署合同，可以订制包括风力机、塔架、电气控制以及混凝土基础在内的完整风力机。以上设备的购置情况将决定安装的最后进程。确定了风力机及其塔架规模后，就可定制为其设计的其余设备并开始安装。例如，风力机和塔架的规模一旦确定，便可以开始场地准备。场地准备包括混凝土地基和底座，以及用于放置系统电力线路的混凝土地基下的地下管道。在这个过程中，必须准确定位塔架安装螺栓的确切位置以及管道和配电柜的位置。混凝土一旦浇筑，将很难改变。挖掘公司为风力机底座挖地基和坑穴，挖掘人员将决定坑穴的尺寸和确保塔架安全所需的混凝土量，使其能承受最大设计风速。若将较大风力机安装在偏远地区风电场，必须建立能让卡车将大型叶片和塔架运送到现场的通道。

11.1.1　场地准备

场地准备包括风力机的基础构筑和机组安装，以及修建安装期间或日后系统维修所需的起重机与服务车辆的通行道路。有时，风力机将会被安装在经过一定开发的地方，例如已经具备了铺设路面或沙砾路面和拥有当地供电部门供电服务的区域。有时，风力机的位置可能很远，必须将道路和电力线路从其他地区进一步延伸到那里。如果是大型风力机和塔架，通往现场的道路必须能够支撑重载并且有足够的区域使运输车辆安全出入。在安装多个风力机的风电场中，可能必须为破损道路进行重新修建，也可能只是将现有道路升级为承载能力更强的道路。在某些情况下，可能需要采样土壤样本，以确定该地区铺设的高速公路表面能否承载风力机和塔架运送车辆这样的重负荷。有时还需土样来确定混凝土地基尺寸，以承受所设计的风力机最大风速时的载荷。地基一旦开挖，必须及时清理风电场内的废弃物。必须注意确保雨雪后能够排除混凝土地基里多余的水。此外，场地准备还包括确定最近并网点。

筑建混凝土地基的下一步是放置加强混凝土地基的钢筋。图 11-1 表示了一个

典型的50kW中型风力发电机组的混凝土地基。图中混凝土地基面积约为20ft × 20ft，约6～10ft深。专门浇筑混凝土地基及垫板的公司通过地基所在地的土壤样本可确定其合适尺寸。图11-2表示了独管式塔架所需的较小混凝土地基。混凝土地基深度由风力发电机组设计的最大风速和功率决定。图11-1所示的情况中，配电柜直接安装于定位在混凝土地基中的导管之上。在其他一些情况下，如图11-2中的独管塔架，导管和配电柜没有安装在混凝土地基上。

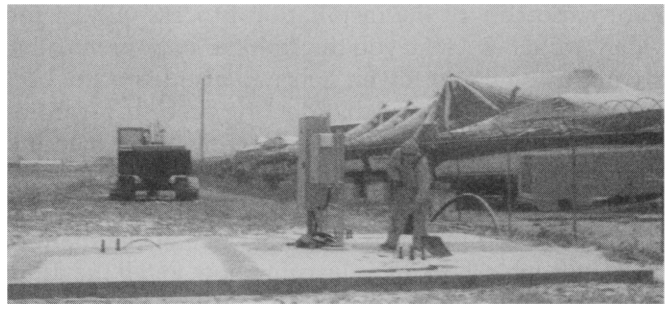


图11-1 准备安装风力机的基座。请注意，浇筑混凝土时，要准确放置塔架的安装螺栓。浇筑基座前地下电力导管也已经就位，塔架竖立前要安装好电气柜（图片来源：John Fellhauer，jfellhauer@surenergyohio.com）

11.1.2 安装风力机所需要的许可及其他文件

安装风力机另一个步骤是申请并取得施工许可证，以及联邦政府、州政府和当地政府机构要求的许可证。这可能也包括来自负责区域内建设的部门许可证。一些州和国家已简化了此过程，以确保能够及时处理。有些地方已经建立了以最大限度吸引风力机安装在其地区内的工作流程。如果风力发电机组安装在居民区，必须满足安全及环境条件，如视野阻隔和减少噪声。有些区域法律规定风力发电机要与房屋、建筑物或公路保持一定距离，这样如果风力机叶片发生松动或从轮毂脱落也不会发生危险。有时许可证和其他文件必须提前获得，有时这些文件是申请并在规划过程中获得的。在一个地区安装多台风力机时，该过程更加容易。

图11-2 浇注较小的风力机独管式塔架混凝土基础。混凝土基础深度足够支持风力机所设计的最大风速（图片来源：John Fellhauer，jfellhauer@surenergyohio.com）

11.1.3　将风力机叶片安装到转子和机舱上

当风力机安装时，需要把地面上的叶片安装到轮毂。在有些风力机中，塔架一旦架起，叶片和转子已固定在安装于塔架上机舱上。图 11-3 表示了几个等待连接叶片的机舱。图 11-4 表示了一个准备出厂的风力机叶片，该图中的机舱和叶片用于较大型风力机。风力机叶片的大小和重量基本决定了其是在地面还是空中安装。对于一些规模较小的风力机，塔架在地面上时，可以将叶片连接到转子上，并将转子连接到机舱。然后，一个或几个大型起重机将组装完整的风力机提升到位，此时叶片已经连接到转子上且轮毂也已安装到机舱上。

图 11-3　安装在塔架上之前，准备将叶片安装在机舱的轮毂上
（图片来源：John Fellhauer，jfellhauer@ surenergyohio. com）

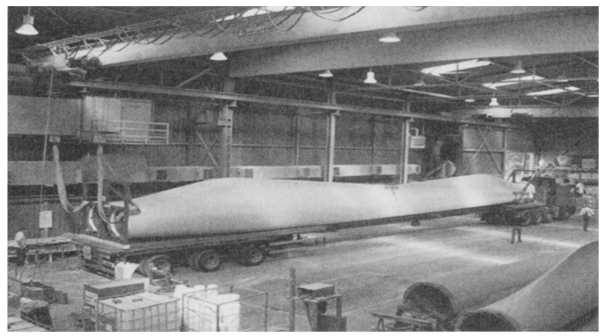


图 11-4　准备运到工地的风力机叶片（图片来源：EWT 国际）

另一种将叶片安装到机舱的方式是当轮毂在地面上时将叶片连接到转子上，然后用大型起重机提起连接好叶片的轮毂到机舱，在空中完成连接。对于一些较大的系统或海上风力机，用直升机将组装好的叶片和轮毂提升到机舱，最后在空中完成连接。这样做的原因是，如果在地面上都组装好，叶片和轮毂将使机舱和塔架过重而难以竖立。如图 11-5 所示，大型起重机正在将机舱安装在塔架上。

如图 11-6 所示，风力机叶片准备安装到转子上，需要使用大量螺栓以确保安

图 11-5 大型风力机机舱吊起并定位后安装到塔架上（图片来源：北方电力公司）

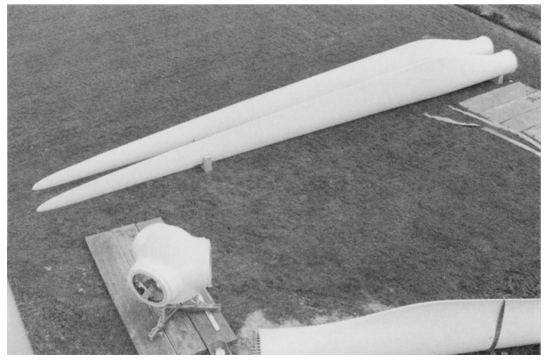


图 11-6 在地面时风力机叶片被安装在转子上。安装了所有叶片的转子再被安装在机舱上（图片来源：EWT 国）

全地将风力机叶片安装到转子上。安装过程的下一步是将叶片和转子提升到机舱，并确保其连接到机舱前方。转子实际上直接连接到在机舱前方延伸出来的低速轴上。如图 11-7 所示，风力机叶片和转子被吊装到突出在机舱前方的低速轴位置处。在大型风力机的安装中，若风力机安装在陆上，这些零部件用大型起重机吊装，如果风力机位于水面或者海上将配用直升机。

图 11-7 安装到风力机机舱的转子和叶片（图片来源：Fotolia）

11.1.4 将机舱或风力机安装到塔架上

组装中型风力机时，可在地面上

将机舱连接到塔架上。有时在地面上的时候也可将叶片安装在机舱上。由于中型风力机不太重，整个组装可由大型起重机吊装就位。如图 11-8 所示，技术人员将中型风力机机舱连接到塔架上。图 11-9 中，技术人员正在拧紧将机舱固定在塔架上的螺母和螺栓。塔架架设后机舱连接到塔架上的难度更高，而塔架在地面上时，技术人员可方便地拧紧螺母和螺栓。

图 11-10 表示了将风力机叶片和转子连接到机舱上。塔架和机舱必须支离地面足够高，以便转子和叶片在安装时不会碰到地面。可以设计一个木制或金属的可调支架，以确保组装到塔架和机舱上时，叶片不会碰到地面。如图 11-11 所示，安装转子时，大型的风力机叶片被支起。

图 11-8　在地面上将中型风力机机舱安装到塔架上（图片来源：John Fellhauer，jfellhauer@ surenergyohio. com）

图 11-9　用螺母和螺栓将机舱安全地固定在中型风力机的塔架上。塔架还在地面上时，螺母已拧紧在螺栓上（图片来源：John Fellhauer，jfellhauer@ surenergyohio. com）

图 11-10　机舱连接到塔架上后，风力机叶片和转子安装在机舱前方突出的轴上。注意此工作中将塔架支离地面的木质结构（图片来源：John Fellhauer，jfellhauer@ surenergyohio. com）

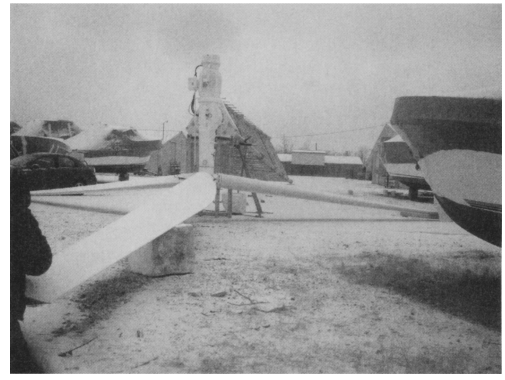


图 11-11　在安装中，风力机叶片较大较重，安装到转子上时必须得到支撑。请注意，机舱和塔架由木质结构支离地面，木质结构提供足够的空间，以便叶片连接到转子上时不会碰到地面（图片来源：John Fellhauer，jfellhauer@ surenergyohio. com）

11.1.5 安装电缆以及进行电气连接

安装过程的下一步是将电缆由机舱经过塔架连接到地面的电气设备上。在大多数小型和中型风力机中，在地面上时电缆就可以穿过塔架。图 11-12 表示了电缆如何穿过塔架。图 11-13 所示为到达地面的电缆的末端。这些电缆有成型末端，使其不会错误连接。在地面上安装到电气面板上的其他电缆也有成型末端，在连接时以便与机舱电缆相配合。这种电气连接类型可以改变电缆长度，并确保电缆连接到正确的位置。

图 11-12 塔架在地面上时，电缆从位于机舱的发电机穿过塔架
（图片来源：John Fellhauer，jfellhauer@surenergyohio.com）

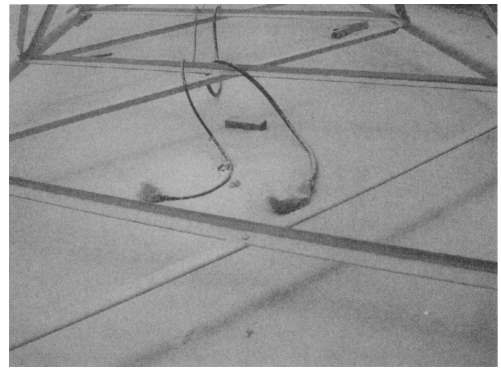


图 11-13 到达地面的电缆末端有成型插接端子，以便能正确连接
（图片来源：John Fellhauer，jfellhauer@surenergyohio.com）

电缆通过塔架时，需要连接到已安装在塔架顶部的发电机上。如图 11-14 所示，技术人员在靠近塔架顶的防水盒中进行电气连接。顶部的电气连接做好后，技术人员移至电缆端部测试电缆的连续性。完成顶端电缆的电气连接后，技术人员在几个点将电缆固定到塔架上，确保其不会在风中摇摆，否则将最终损坏电缆。

当叶片和转子安装到塔架上以及完成电气连接后，就会用起重吊索将机舱捆绑。该吊索的另一端连接到起重机缆绳上。吊索要安全准确地系好机舱和叶片，以便塔架提升就位时不会滑出吊索而损坏。如图 11-15 所示，技术人员将吊索放置在机舱和转子叶片周围，并连接到起重机的缆绳上。

吊装风力机时，要确保风力机叶片与塔架之间的安全，使其不会自由旋转。如果风力机叶片转动，可能接触到地面并损坏，或者可能碰到技术人员造成伤亡。如图 11-16 所示，技术人员正在检查风力机叶片与塔架之间的安全，以便在塔架提升就位时不会旋转。塔架安全竖起后，技术人员需爬上塔架移除提升中用于确保叶片与塔架之间安全的缆绳。

一个典型的起重机如图 11-17 所示。用来吊装风力机的起重机必须能够提起比风力机实际重量还重的负荷。例如，桁架式塔架可能重达 7000lb，另外风力机叶

片、转子和传动系统可能重达 5000lb，所以起重机必须能够吊起超过 12000lb 的重量。塔架、转子和传动系统的技术数据将列出这些组成部分的实际重量。

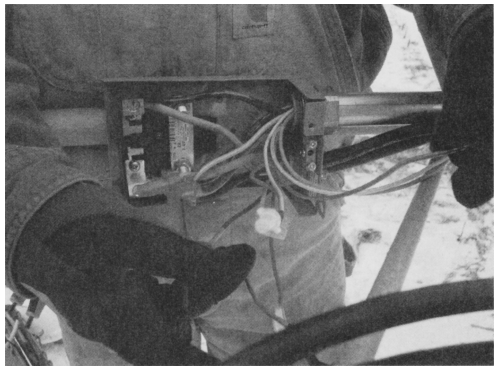


图 11-14　技术人员将电缆连接到发电机的缆绳上。电气箱是防水的，盖子拧紧能将雨水和潮气隔离到箱外（图片来源：John Fellhauer，jfellhauer@ surenergyohio. com）

图 11-15　技术人员正在用吊索缠绕机舱以便可以提升到位。吊索的另一端连接到起重机的缆绳上（图片来源：John Fellhauer，jfellhauer@ surenergyohio. com）

图 11-16　在吊装过程中技术人员检查风力机叶片与塔架之间的安全，以防止其自由摆动造成损坏或伤到吊装过程中的技术人员（图片来源：John Fellhauer，jfellhauer@ surenergyohio. com）

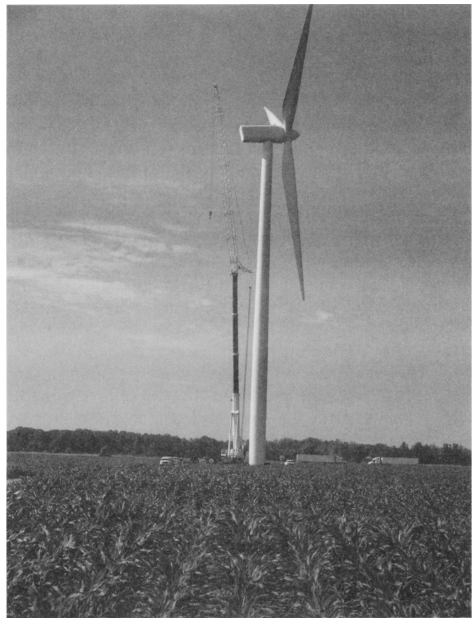


图 11-17　一个典型的用来吊装大型风力机塔架的起重机

起重机开始吊装塔架和风力机时，安全做法是让起重机提起塔架几英寸后测试平衡，确保吊索和缆绳不会滑动。这样塔架只移动了几英寸，可以很容易地迅速降低并作出调整。一旦技术人员确定了吊索和电缆的安全性，塔架由起重机吊装就位。如图 11-18 所示，起重机用吊索和缆绳提升塔架。如图 11-19 所示，起重机垂直提起塔架，风力机和塔架平稳离开地面。如图 11-20 所示，塔架固定在安装螺栓上。塔架垂直定位在安装螺栓上后，技术人员很快把螺母和螺栓拧紧以确保塔架就位。

图 11-18　起重机开始拉紧缆绳和吊索时测试索具，以确保一切安全（图片来源：John Fellhauer，jfellhauer@ surenergyohio. com）

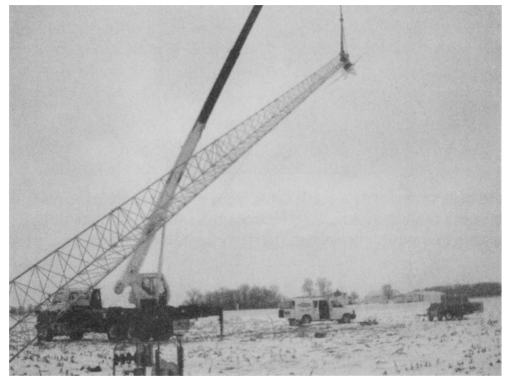


图 11-19　起重机垂直吊起塔架、传动系统和叶片至大约一半的高度（图片来源：John Fellhauer，jfellhauer@ surenergyohio. com）

图 11-20　塔架垂直定位在螺栓上后，技术人员快速将螺母放置在安装螺栓上（图片来源：John Fellhauer，jfellhauer@ surenergyohio. com）

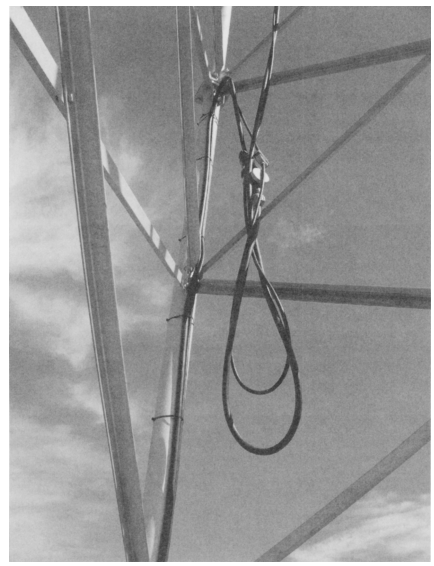


图 11-21　对来自风力机的电缆与来自配电柜的电缆进行插接。在电缆上放置一个小环，以减轻电缆的压力

11.1.6　到风力机配电柜电气接线

风力机安装过程的下一步是将从塔架下来的电缆接到风力机的配电柜上。浇筑混凝土地基时，会敷设用于放置连接配电柜电缆的大型金属导管。技术人员将拉带滑入导管，并在管道末端进入配电柜。然后拉动拉带使其完全通过导管，一端悬挂在管道之外。通过将带成型插接端子的电缆与拉带相连，以便电缆的一端可拉进配电柜，并使其伸出管道，这样可与从发电机出发经由塔架的电缆连接在一起。两个插接端子连接在一起，在电缆上安装一个小环来缓解受力，使电缆不会因为拉得太紧而压力过大。图 11-21 表示了电缆成型插接端子和电缆上缓解受力的小环。

图 11-22 表示了安装在配电柜前门的电气接线图。双路电缆沿着塔架下来，从发电机连接到电气柜的主断路器上。

图 11-23 表示了配电柜以及由其底部接入的大型黑色电缆。风力机的电缆连接到配电柜后，将风力机接入电网的电线连接到电气柜上。电气柜具有 PLC 或其他类型的计算机控制器，控制风力机并网。

图 11-24 表示了风力机安装处电网接入点的例子，从图中可以看到电力公司的架空线路。这些线路来自提供 240V 商业用电的变压器，电线直接沿着塔杆下来连接到具有电能计量作用的电气柜上。与电表相连的还有隔离开关，如果在室内进行电气维护，隔离开关可以断开来自电力公司的电压。

风力机安装完成后，将用双向电能表测量来自电力公司的电量或由风力发电机产生的电量。通常情况下，风力机产生的没有被用完的多余电能，可以送回电网。

图 11-25 中的隔离开关装在风力机的变压器顶部。国家电气规范（NEC）规定安全隔离开关必须安装在风力机和现有电路之间。需要断开或隔离来自风力机的电压时，隔离开关可随时手动切换到断开位置。来自风力机隔离开关和变压器的线路与电表相连，这就是所谓的系统连接点，也是风力机的并网点。

11.1.7　测试风力机的初始运行

所有的电气连接完成并经过测试后，技术人员爬上塔架移除用来防止叶片旋转的绳索。技术人员爬上塔架或离开地面工作时，按照 OSHA 的规定，必须佩戴个人防护装备（PPE），如安全带。图 11-26 中，技术人员正系着安全带爬上塔架。技术人员用系索将安全带系到塔架上，这样可以防止未抓稳或打滑时发生的意外跌落。技术人员到达塔架顶后，可以移除叶片的绳索。技术人员要保持叶片清洁并且从塔架上完成系列工作，这点至关重要。在一些风力机中，技术人员在塔架上或在叶片和转子周围工作时，采用机械式制动防止叶片转动。

技术人员检查完风力机各部分，并确定系统可以安全启动时，便可爬下塔架。当风速达到启动阈值时，风力机叶片被释放并开始转动发电。在此期间，要密切监视叶片转速和产生的电压。此外，对于风力机的机械部分，如叶片、转子、低速

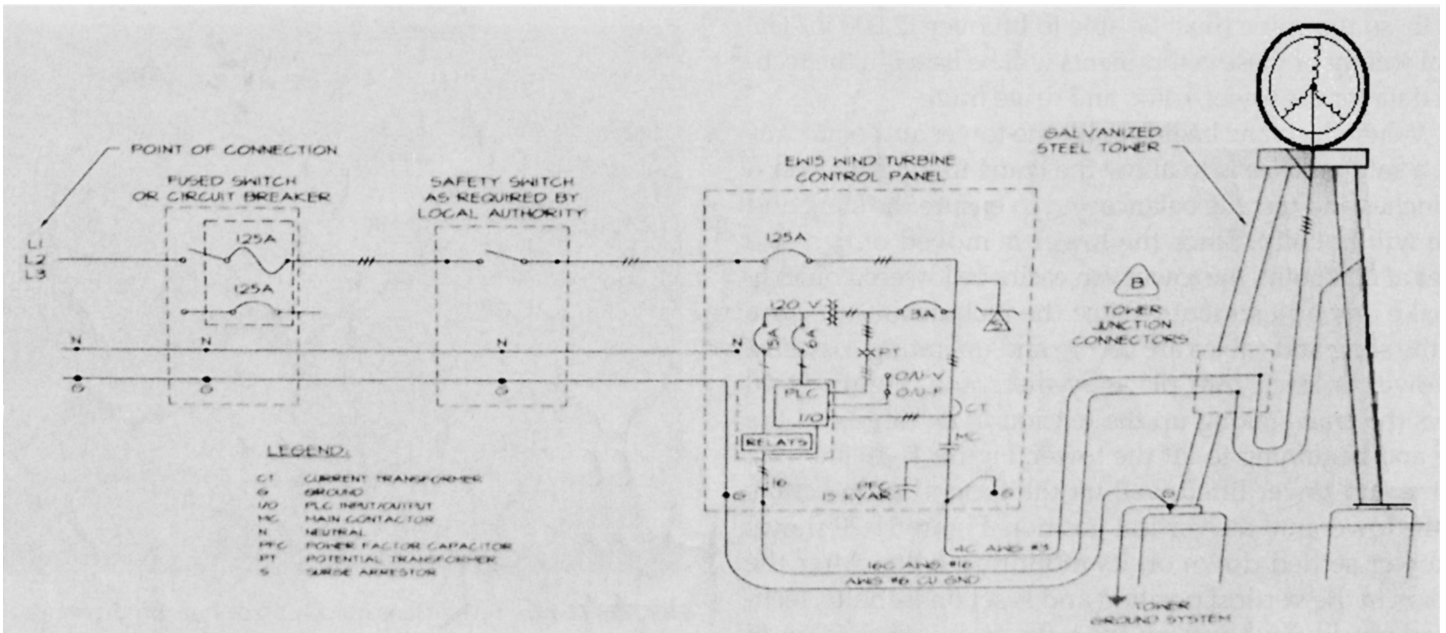


图11-22 电器柜门上的电气接线图

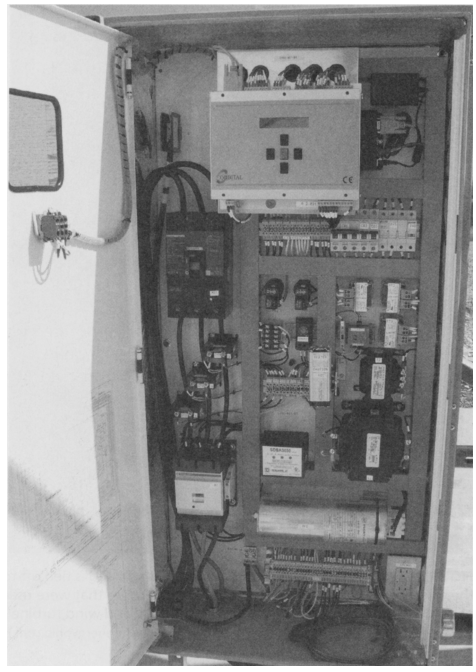


图 11-23　风力机的电气柜。来自风力发电机的电线从左侧进入电柜，并连接到断路器

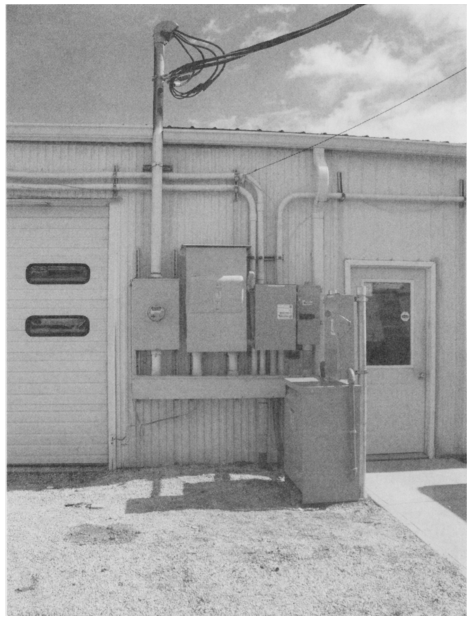


图 11-24　来自电力公司的高级供电服务入口以及安装在电压接入室处的电表。注意最左边的电表。配电柜前的两个盒子是为风力机设计的，内部为变压器和所需的安全隔离开关。图 11-25 更清晰地展示了变压器和隔离开关

图 11-25　连接到风力机电缆上的电气隔离开关和变压器

轴、齿轮箱或传动系统、高速轴和发电机，要监测振动、错位或其他机械故障的迹象。风力机发电几个小时后，技术人员要停止风力机，然后检查风力机组装时安装的所有螺母和螺栓，并检查任何可能松动或不能正常工作的其他机械系统。技术人员也要检查是否有会损坏系统的磨损或过热迹象。这些小问题在系统完全并网前很容易发现并修复，但如果没有检查出来，会发展成为大问题并损坏风力机。重要的是要记住，风力机一旦投入生产，运行时将没有近距离监测，因此可能会长期运行却没有任何人在现场监测。

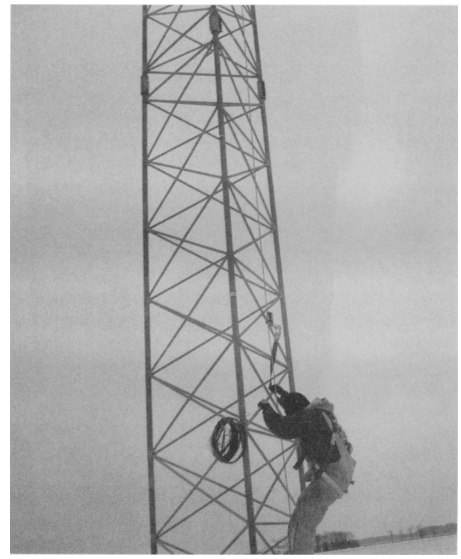


图 11-26 爬上塔架移除在塔架和风力机竖立时用来固定叶片的绳索，技术人员带着安全带并系在塔架上（图片来源：John Fellhauer，jfellhauer@ surenergyohio. com）

11.2 故障诊断概述

许多技术人员认为，故障诊断就是在检查系统时确定哪些地方损坏的过程。本节表明实际上比较容易确定哪些是正常工作的系统，通过一个筛选过程，可只注重系统出现故障的部分。本节介绍了要成为一名高效故障诊断人员的所有细节。

本节介绍了如何进行故障诊断，并有条不紊、系统地测试组件的固定流程。一些技术人员诊断故障失败，是因为其基本上只是记住系统中最后损坏的位置，并由此入手，好像问题是简单地重复似的。另外一些技术人员诊断故障失败，是因为没有使用系统的检测方法；相反，他们随机测试系统的不同部分和区域，对于测试什么以及为什么测试没有概念。本节介绍了如何建立一套每次对风力机进行故障诊断时都用到的程序。

对风力机进行故障诊断的第一步是确定在发生故障之前该系统的工作状态。有时，简单回顾风力机的数据收集系统就可以做到这一点。可以查看数据，通过有关的一系列问题来确定故障发生前，或者故障已经发生了一段时间后，风力机是否工作正常。检查了整个风力机以后，可以尝试运行风力机的不同部分。有时，风力机可以部分运行，或者说风力机的一部分（如叶片和转子）可以运行，而另一部分（如发电机）不能运行。因此可只专注于该系统无法正常工作的部分。

对风力机进行故障诊断是一个非常复杂和繁重的工作。有经验的技术人员工作时，会使用许多方法来确定系统发生了何种故障。例如，可能花几分钟只是观察整个系统得知哪些组件正在运行或者起动；也可能试图确定风力机有哪些动力系统，如机械部件、电气元件，或者其他子系统，如液压系统，并且观察其是否都在正常运行。确定风力机有哪些类型和多少个子系统至关重要。风力机具体类型的确定非常重要，例如是上风式还是下风式？是否使用电动机或液压系统改变偏航方向或桨叶节距，或这些由风力或离心力改变？系统是否有齿轮箱或传动系统，或者是不是直驱系统，以及系统使用的是什么类型的发电机及控制系统等。

最后，可能需要一分钟来确定风力机是采用常规硬接线控制还是计算机或 PLC 控制。系统如果由计算机或 PLC 控制，需要确定有没有其他数据表明最后几小时或几天风力机工作情况，或者有没有故障码或通过状态指示灯显示问题。

故障诊断过程的第二个步骤，包括使用其他感官，不只是视觉。例如，通过听来自转子、轴和齿轮箱的噪声来确定其是否在超负荷运行。是否有齿轮、轴承，或其他机械部件发出表明其正在非正常运行并且制造摩擦的尖叫声或低啸声？另一个应该听的部件是电机，如发出嗡嗡声却不运行的偏航电动机。这些线索有助于确定风力机发生何种故障。另一种通常被忽视的感觉是嗅觉。有时，通过其他某种测试确定发生故障前，能通过嗅觉确定发电机、电气元件或轴承是否过热。

11.2.1　使用公司资源，如手册、公告、安全警示以及帮助系统

大多数风力机制造商有自己的网站或电话中心，提供其系统可能发生问题的额外信息。制造商通过网站来发布公告，也可能给其经销商发送公告，使其了解已经遇到的种种问题。制造商也可能提供详细的技术手册或技术帮助系统，通过电子邮件或直接交谈了解遇到的有关情况和问题。制造商也希望了解各种问题，并将其添加到数据库中。制造商的网站可能也设计有叫作常见问题（FAQ）的页面，包括其系统常见问题和解答。很多时候，FAQ 页面上的解答，能提供完成一个测试所需的信息，或提供其他相关信息。

此外可以利用互联网来搜索所遇到的问题，或者加入风力机技术人员的网上群或论坛，风力机技术人员将回答发布在论坛上的问题。使用互联网搜寻问题时，搜索会提供类似的问题，或者找到以前不知道的公告或报告等资料。

11.2.2　由最可能的到最不可能的故障诊断

另一种故障诊断的方式是寻找最可能发生的故障，并先检查出来，然后再转移到不太可能发生的故障上来。例如，风力机已无故障运行几个月后，要检查最可能发生问题的部分，如需要润滑的零件、随着时间的推移可能出现松动的零件、长时间运行可能受到更多磨损的零件。一般的人都不会从查看可能十年才发生一次的故障开始。更加熟悉风力机后，会掌握哪些部件更容易发生故障以及其故障模式，还会发现往往出现在一些特定品牌或型号上的问题。

11.2.3 更换零件

检查完风力机并已找到出现故障的组件后，可能要更换零件，以确定怀疑有故障的零件的确是坏的。更换零件可能会涉及服务车辆或备件存储位置以便寻找完好零件，然后更换怀疑损坏了的零件。该过程有既有优点也有缺点。优点是，如果零件昂贵，或需要两三天的运输时间，可确保在订购新零件并等待运输之前确定有故障的零件。缺点是，一些技术人员在彻底测试零件前，盲目采用零件替换法，基本上属于猜哪个零件是坏的，因此可能会浪费很多时间来更换没有坏的零件。

更换零件时应该遵循的基本原则是，确保在零件的自然运行状态下系统地测试，并在断电情况下完成选择性测试。如果已完成这些测试，并且确定零件是有故障的，可安全地更改或更换该零件来验证此前的怀疑。

11.2.4 保修工作

有时，要求进行可能还在保修期内的新风力机的相关工作。安装或制造公司需保障支持该项工作的部分或全部零件以及部分人工。若怀疑或有记录表明风力机是新的并且在保修期内，需要确认打算如何处理，如更换零件。可能需要联系制造或安装风力机的公司来确定适当的维修零件，可能将故障零件送回公司，进行检查并找出引起故障的原因。由此可见，更换保修零件时，公司还需要更多整个系统的详细信息，如安装日期、该系统已运行小时数，以及遇到问题的原因，如整体故障导致的，或是一个独立故障导致的。该公司还想要发送并更换的零件的编号，以确定其是系统出厂时安装的原始零件，还是已经被替换过。有时在保修期内同样的问题出现不止一次。如果是这种情况，公司要确定第一次更换零件时是否合适地更换了零件，并且第二次故障是不是由于不合理安装零件或者没有正确执行服务而造成的。

11.2.5 保证风力机的准确记录和维护日志

风力机工作时，每个系统都有其维护日志，用来记录所有维护情况，从周期性维护到故障以及替换的零件。准确的日期、时间以及系统运行小时数是要写入日志的重要数据。有些系统通过 PLC 或计算机创建电子化日志记录。有些系统可能使用软件程序，不断监测风力机并记录用于查找及诊断故障的特定数据。系统收集的数据类型包括风速、风向、一天运行的时间、发电机发出的功率以及系统全功率运行的百分比。这些数据可能由表格或者图表的形式提供。这种类型的信息对系统进行故障诊断非常有价值。

11.3 故障诊断流程

检查风力机问题时，需调用故障诊断流程。技术人员第一次学习故障诊断，会认为这一过程就是尽快找出问题。相反，找到问题的最好方式是要确定系统的哪些部分工作正常，然后从流程中排除它们。如果系统有多个部分，如机械（风力机

叶片和转动的转子）、电气（发电机和输电电缆）、传动（轴、齿轮箱和变速箱）以及包括制动和叶片调整的液压系统，需要检查每个系统，并确定哪些是正常工作的，哪些不是。

理解该概念的另一种方式，是用找出一副扑克牌中的特定牌的方式来理解对风力机进行故障诊断的过程。每一张牌代表不同的问题，假设从中拿出一张牌，然后猜是什么牌，这就类似于风力机中的一个系统有问题，尝试对这个系统进行故障诊断识别出是哪个系统有问题。众所周知，一副标准扑克牌有 52 张，其中红桃和方片是红色的，黑桃和梅花是黑色的。如果只是猜测，没有方法，可能要猜 52 次才能猜到正确的牌。本节介绍了一种方法，可用来对风力机进行故障诊断。

对于该例子，比方说，拿出的牌是红桃 9。用该过程，第一个问题是问牌是不是黑色的。答案是否定的，所以可推断，拿出的牌肯定是红色的。这一个问题排除了 50% 的牌。现在知道该牌肯定是红桃或者方片，所以可以不用考虑所有的黑桃和梅花。

接下来的问题是牌是不是红桃。无论是问牌是不是红桃或者是问牌是不是方片都没关系，因为答案会显示是哪种。在这种情况下，答案是肯定的，该牌是红桃，这样就可以停止考虑所有的方片。用两个问题，已经排除了 75% 的牌。

现在知道该牌是红桃，继续询问一次排除剩余牌的 50%。因为从最大 A 到最小的 2 有 13 张，下一个问题是该牌是否比 8 小。答案是否定的，所以已经排除了 2、3、4、5、6 和 7。其余的牌是 8、9、10、J、Q、K 和 A。由于 Q 或 J 是中点，接下来要问的是牌是否比 Q 小。答案是肯定的，所以现在知道牌肯定是 J、10 或 9。接下来的问题是，牌是否比 10 小。既然答案是肯定的，现在知道该牌是红桃 9。

你可能想知道寻找一副牌中的一张的例子对于故障诊断的用处。一副牌有 4 种花色：方片、黑桃、红桃和梅花，代表了大多数风力机的子系统：叶片和转子、电气（发电机和电缆）、传动（轴、齿轮箱和变速箱）以及包括制动和叶片调整的液压系统。遇到不发电的风力机，第一个问题应确定哪些系统的是工作的，哪些是无效的。需要制订一系列的问题和测验，来排除大部分的可能性。

例如风力机叶片在转动，但当测量电气柜时，系统不产生任何电压。由此可见，风力机在电气柜不产生任何电压，系统的任何部分都可能有故障，如风力机叶片、转子、低速轴、齿轮箱、高速轴、发电机、电力电缆、隔离开关和断路器等。用故障诊断过程，可以先问发电机轴是否转动。如果答案是肯定的，风力机叶片、转子、低速轴、齿轮箱和高速轴都在工作，可以从该过程中排除。然后，集中注意力对发电机、控制系统及连接到配电柜上的线路进行故障诊断测试。

如果发电机轴是否转动问题的答案是发电机轴不转，那么可以排除发电机和电缆并集中注意力在使高速轴转动的传动部件上。由此可见，使用该故障诊断过程，通过排除系统所有正常工作的部分，能更迅速地发现问题。使用这一过程的关键是

要正确识别风力机的子部分，并确定哪些部分向其他部分输送能量。

11.4 症状与问题之间的区别

第一次开始学故障诊断时，找到造成风力机无法工作的情况并进行维护，有时却发现这种情况再次发生。例如，对发电机无法产生电压的风力机进行故障诊断，发现有一个断路器跳闸，复位断路器后发电机将开始产生电压，在当天晚些时候，相同的断路器却再次跳闸。这是发现了一个症状，而不是问题。断路器跳闸断开电路，造成发电机停止产生电压，但没有找到导致断路器跳闸的实际问题。对这种情况进行更深入调查，可能最终发现发电机有一根松动的导线，导致该断路器跳闸。拧紧导线端子的螺母，便解决了该问题，断路器不会再跳闸。这个过程被称为发现问题，而不是消除症状。发现实际的问题，称为寻找问题的根源。进行故障诊断并发现导致风力机无法工作的情况时，需要问自己找到的是症状还是问题。

11.5 故障诊断表与故障诊断矩阵的使用

对风力机进行故障诊断时，系统自带的手册是很好的参考资料。一些大型的风力机提供一个或多个操作、维护及故障诊断手册。这些手册可能有一个或多个表格，表示了检查子系统的逐步过程。图 11-27 给出了这种故障表格的例子。该表有三列：症状、可能的原因及纠正措施。症状列概述了可能遇到的问题的类型。中间一栏显示了此症状的一个或多个可能的原因。第三列列举了纠正问题需要考虑的事情。症状不一定是问题，所以需要仔细审查症状，以确定实际问题。例如，如果症状是电压缺失，可以通过更换熔断器或重置断路器来排除此症状，但必须更深入地检查系统，以找到造成熔断器熔断的问题所在。该类表格是用来作为指导的，要找到所有问题，可能还不够详细。一些制造商也提供了故障矩阵或故障表来表示操作顺序。此表表示了系统操作顺序中第一步发生了什么以及下一步进展。这种类型的故障信息将帮助确定系统的哪些部分正在工作，以及在哪一点系统停止工作。

症状	可能的原因	纠正措施
1. 即使在强风中桨叶也旋转缓慢，无法起动	a. 制动（运行在开关断开状态） b. 电池电量耗尽或低电压 c. 控制器的整流二极管短路 d. 发电机电刷坏了 e. 如果是新安装，发电机接线不正确	a. 将运行开关置于 ON 位置 b. 给电池充电或更换有缺陷的 c. 检查二极管并更换坏的 d. 检查电刷并更换磨损的电刷 e. 检查发电机接线并根据需要进行更换

图 11-27 风力机故障表

症状	可能的原因	纠正措施
2. 桨叶运行太快，无机械噪声，无输出	a. 控制器从电源或电网断开发电机 b. 一个或多个发电机绕组断开或发电机和电源之间接线断开 c. 控制器二极管断开	a. 检查控制器故障断开情况 b. 测试发电机绕组是否断开，如果需要更换发电机 c. 检查二极管是否断开并更换损坏的
3. 桨叶运行太快，无机械噪声	a. 电池过充电，发电机无负荷 b. 如果是新安装，发电机接线不正确	a. 检查电源电压调节器故障，并检查发电机和负荷之间的断线 b. 检查发电机接线并根据需要进行更换
4. 桨叶运行太快，输出小于 50%，有机械噪声	a. 发电机电源或负荷之间断线 b. 二极管控制器断开 c. 发电机电刷或集电环损坏 d. 如果是新安装，发电机接线不正确	a. 检查发电机与电源或负荷之间断线。更换损坏的电线 b. 检查断开的二极管并更换坏的 c. 检查磨损或坏的电刷并根据需要更换 d. 检查发电机接线并根据需要进行更换
5. 桨叶运行太慢，输出小于 50%，无机械噪声	a. 电池电压低或电池没电 b. 如果是新安装，发电机接线不正确	a. 电池充电或更换坏电池 b. 检查发电机接线并根据需要进行更换

图 11-27　风力机故障表（续）

11.6　风力机转换与传动故障诊断

有些必须处理的问题包括风力机叶片、转子、低速轴、传动箱、高速轴或发电机。这些问题通常发生在通过所有的轴及传动系统将能量从叶片输送到发电机的链路中。典型问题有零件之间连接松动，如转子和低速轴、低速轴和齿轮箱、齿轮箱和高速轴或高速轴和发电机之间。每个连接都包括螺母、螺栓以及其他需要进行检查的连接器件，以确保其在风力机的整个使用期内是紧固的。每个连接点也有可能会错位，因此必须全部检查校准和进行振动分析。一个完整的振动分析对于确保能量顺利地从风力机叶片一直输送到发电机至关重要。该校准必须作为贯穿风力机整个使用期的预防性维护计划的一部分。

此外，一旦怀疑有振动，必须检查所有轴和齿轮箱的校准。错位轴的振动会被放大到系统中的每个点，并最终对轴承及其他零件造成重大损害。该系统中的任何连接点松动，将会导致错位以及引起轴振动。振动最终会传递到轴承，造成严重损坏。

机械系统中定期检查或发生问题时故障诊断的另一部分是桨叶节距控制系统。

节距控制系统提供了桨叶节距控制。在某些系统中，这是通用的控制系统，采用机械零件或液压来移动叶片。该控制系统有两部分：一个是传感器，告知 PLC 或计算机桨叶节距应为多少，第二部分是实际移动叶片的液压或机械机构的输出控制。基本上，传感器告知计算机应往哪里移动叶片，然后检查叶片是否移动到该位置。对该部分进行故障诊断时，应从传感器开始，以确定指示的是不是叶片实际的位置。传感器信号实质上是模拟的并且介于 0 ~ 100% 的全部值。故障诊断过程的下一步是观察 PLC 或计算机如何测量这种输入传感器。PLC 的控制电路显示需要移动多少节距的输出控制。测试该部分时，风力机没有满负荷是非常重要的。将该电路置于手动控制并使数值从 0 ~ 100% 变动，使得叶片可以全范围移动。怀疑节距控制有问题时，应把系统置于手动控制并测试其全部范围。如果在手动控制下可以在全范围内移动，然后将其置于自动控制，并允许传感器控制桨叶节距。

如果叶片控制运行正常，并且刮风时叶片能驱动转子，那么故障诊断的下一步是跟踪经过低速轴到齿轮箱的能量。需要对齿轮箱进行故障诊断，观测输入转速和输出转速是否成比例。此外，齿轮箱需要检测过大的振动以及由于故障产生多余热量引起的问题。齿轮箱的故障可能是齿轮啮合和齿轮的润滑。如果齿轮磨损、过载或缺乏润滑，齿轮箱将过热并造成损坏。如果怀疑齿轮箱有问题，可以自己检查，或者请一些公司的机械专家来详细检查系统，如有必要则更换齿轮箱。

低速轴和高速轴需要检查的其他部分包括连接端。系统每两个轴的末端有连接端，以防止错位及振动传至轴中。必须检查连接端的润滑，以确保其没有松动。如果公共连接点有任何问题，通常必须更换，而不是维护。

11.7 机械及塔架故障诊断

另一部分需要测试和故障诊断的机械系统是偏航控制。偏航控制系统的工作原理与节距控制方式相同，由传感器指示风力机偏航应定位的位置。该系统也应在手动控制下检测，输入 0 ~ 100% 的值到计算机或 PLC，并且其控制程序将数值发送给偏航控制电动机，使其顺时针或逆时针旋转。系统在手动控制时，技术人员需要清楚偏航位置，这样才不会失控。如果偏航控制系统响应使其在各个方向旋转的手动控制信号，那么可将系统置于自动控制模式，传感器会告知 PLC 将偏航电动机移到哪里。

必须定期检查塔架，确保其牢固可靠，并且没有出现任何腐蚀或其他损坏的迹象。还必须检查塔架以确保其仍在安装的位置。如果塔架有拉索，必须进行检查，确保其没有磨损，并且其张力仍然是合理的。

需要检查机舱在哪里连接到塔架，以确保连接螺母和螺栓仍然安全。检查机舱密封有没有问题，并且所有通道门符合安全要求。一般来说，塔架和机舱不会造成需要进行故障诊断的问题；相反，只需要定期检查就能确保其仍然完好无损。大多

数风力机制造商提供了一份检查计划清单，其中的时间表一般指定运行小时数，或严格按照日历日期。

11.8　电气故障诊断

遇到风力机的电气问题时，需要能够读取电气原理（梯形）图和接线图以及电子图，以对系统进行故障诊断。还需知道如何用电压表、欧姆表、电表或者绝缘电阻表并进行适当的测量。要学会何时使用哪种类型的仪表进行这些测量。如需更多有关基本用电的信息，本书第 12 章将提供相关内容。

11.8.1　何时使用电压表进行故障诊断

电压表是大多数技术人员的首选。电压表使得技术人员能够测试许多带电电路。测试带电电路的电压或许听起来很危险，但只要在进行这些测试时，接触带电终端时小心潜在电击，则可保证安全。个人防护装备（PPE）可确保在带电电路上安全工作，个人防护设备包括皮革和橡胶手套、厚橡胶底靴以及厚橡胶垫。学会安全地进行电压测量以及准确地读表至关重要。确定故障发生时，电路中电压中断的确切位置是故障诊断的关键。通过确定电压中断的位置，将能够确定发生电气问题的故障点。

带电电路的电压测量使得技术人员在不断开任何接线或部件的情况下能够进行大量初步测试。如果对一个完全停止产生电压的风力机进行故障诊断，此时电压中断，类似于电路中的开路。第一个需用电压表进行的测试是测量系统中来自电力公司配电柜的电源电压。应将电压表始终设置在最高电压范围，直到确定了实际电压。测量完电源电压，需要使用风力机的电气图并测量怀疑电压中断的每个电路。发现电压缺失时，可以关闭系统电源，锁定并标记出来，断开怀疑有故障的导线或元件，用欧姆表进行测试。

此故障诊断可能包括检查继电器的线圈或触点，以及来自电子电路的电压。大多数电气图显示了需要测试的电路不同点的电压值。可使用电压表来定位电路中失去电压的点。应熟悉指示风力机电气系统操作顺序的原理（梯形）图。接线图上显示了组件接线端子的位置，如在电气柜中寻找，会发现组件安装在哪里。接线图看起来就像给电气柜拍了张照片。

还应了解一些在测量电压时可能遇到的问题。第一个问题是电压通过电路反馈。这通常发生在有熔断器或某处断线的电路中。如果在两端供电的电路中有一个熔断器，电压从熔断器完好的供电线路通过变压器绕组或电动机绕组反馈到熔断器输出端。测试每个熔断器输出端时，用仪表测量电压显示所有熔断器完好。如果发现的确如此，可以从熔断器底座取出所有熔丝并用欧姆表测试其连续性。从熔断器底座取出熔丝，并且如果打算用欧姆表测试其连续性以确定熔丝是好还是坏，必须保证断开电源。

如果电路有熔断器，电路中没有任何电流，也可在电路带电情况下检测电流。也会通过任何一台运行中或者起动时绕组断开的单相电动机，以及三相绕组中某一绕组断开其他绕组完好的三相电动机中获得反馈电压。需要注意，产生反馈电压时，如果怀疑读到的电压来自反馈源，可以仔细检查电压源。确保不发生反馈的另一种方法是移除任何元件的端子或导线，如电动机、继电器或指示灯，这些可能是反馈电压的路径。

另一个需要注意的电气问题是，风力机的电气控制系统可能会导致在电路中显示奇怪的电压值。如果电路有一个逆变器，或者使用变频器，能产生大于或小于60Hz 的电压。由于大多数数字和模拟电压表是为测量 60Hz 电压设计的，频率改变，仪表上的电压读数可能会稍微大于或小于其实际值。这可能使技术人员认为，由于电压高于或低于额定值或规格参数，该电路有故障，而实际上它是运行正常的。如果使用真正的有效值读数电压表，无论是多大频率，总会得到该类电路的一个准确读数。如果把表置于交流电压读数模式而实际上是在测量直流电压，表上显示的测量电压也是不正确的。如果把表置于直流电压读数模式而实际上是在测量交流电压，也是同样的道理。另一种解决这个问题的方法是使用示波表，其实际上是一个数字示波器，可以显示测量电压的波形以及电压值。

使用电压表测量无论是装在工具箱中的小电池，还是已知的 110V 交流电源，确保第一次拿出来进行测量时，电压表和表引线工作正常。要确保在使用其测量一个带电电路前，电压表能够正确地测量测试电压。如果仪表损坏或仪表引线故障，即使电路完全带电，仪表显示电压为零。由此可见，使用一个已知值的测试电压，如一个小电池，确保带电电路进行故障诊断前该仪表工作正常至关重要。

有些技术人员还使用二次仪表简单地检测电压的存在。这种类型的简单仪表发出声音或“滴答”声，表明电压存在和电路带电。该仪表是电压表的极好补充，以确保电路安全工作。对电路进行工作时的一个很好原则是，假定每个电路施加电压并且带电，并这样对待。

11.8.2 何时使用欧姆表进行故障诊断

明白何时使用欧姆表同样很重要。在用欧姆表进行测量前必须关闭电路中所有电源，因为欧姆表具有非常小的阻抗（电阻）。阻抗小时，如果将表引线接到有电压端子，就会产生短路路径。这将引起很大的电流而产生火花，并导致金属铜导线熔化或表灼伤人脸。欧姆表端子接到有电压的电路上时，会损坏仪表。

大多数情况下，用电压表定位出断开的熔断器、故障开关、断开的电动机绕组或断线后，使用欧姆表在断电情况下进行连续性测试，即测量电阻值。基本上，测试表明以下两种情况中的一种：非常小的电阻表明熔断器是完好的或开关是闭合的；非常大的电阻表明熔断器或开关是断开的。用模拟表计进行连续性测试时，应通过将仪表端子短接将仪表置零并用最低的欧姆设置。如果在测试中将仪表端子短接时仪表没有指示小电阻或零电阻值，仪表本身可能熔断器熔断，或者端线可能有

问题。非常大的电阻称为无穷大电阻，并表明触点或导线发生开路。如果使用的是数字电压表，一定要检查仪表如何表明无穷大电阻测量，如屏幕上闪烁的数字或一个很大的数字如 9999。可以通过观察仪表是否正常，打开仪表并且置于电阻测量，观察测量无穷大电阻时仪表显示的数值。只要仪表端子没有接触，就可模拟无穷大电阻的情况。此时注意无穷大读数时表计的显示情况。其次，将仪表端子短接，这是一种小电阻测量。当仪表端子短接时，检查仪表的显示并注意显示应为 000Ω。

如果正在测试线路并且读数是无穷大，这个测试表明线路发生故障（断开），必须更换。如果正在测试一个开关，确定连接到正确的端子，然后从打开到闭合位置改变开关几次，以确保正确地检查开关。如果仪表读数仍然是无穷大，开关触点发生故障（断开），必须更换开关。

欧姆表的另一个用途是测量电动机、变压器或线圈绕组的实际阻值。测试单相电动机时，应精确地测量每个绕组电阻，以确定最大电阻读数的绕组是起动绕组，最小电阻读数的绕组是运行绕组。如果测量三相电动机的电阻，每个绕组都应该有相同的电阻值。如果对电子电路进行故障诊断，也需要精确地测量电阻值。例如，试图找出一个二极管、晶体管、晶闸管整流器（SCR）或双向晶闸管的端子时，需要测量电阻，并确定端子的极性。一定要切换仪表到能为电子设备提供最精确电阻读数的设置。由于欧姆表自身有电源，一般都有一个用于测量电子元器件的设置。

11.8.3　用绝缘电阻表测试元件和线路

绝缘电阻表是一个专门用于测量 600 ~ 2500V 电缆、变压器绕组以及电动机绕组通过其绝缘泄漏电流的欧姆表。绝缘电阻表是一个 AVO 国际（原 Biddle 公司）的注册商标，但无论是什么制造商该术语广泛用于所有类似的测试中。使用绝缘电阻表，必须切断电路的电压，并且在测试中必须隔离这些线路和元件。绝缘电阻表在电动机绕组或电缆上施加很短时间的电压，通常不到几分钟，并测试其漏电流，如果有漏电流，表明了绕组或电缆的绝缘故障。通过绝缘的漏电流测量结果以电阻单位（MΩ）显示在绝缘电阻表上。小读数（小于 100MΩ）表示绕组或电缆可能存在绝缘问题。电阻读数越大越好，绕组上的大电阻读数表明绝缘状况良好并且绕组没有短路。有时水分会进入电动机绕组或变压器绕组，并导致绕组绝缘电阻低于平时。绝缘电阻表测试通常用于电动机、变压器或怀疑发生故障的电缆。绝缘电阻表测试可在这些组件完全发生故障并损坏系统其他组件前被发现。在决定清除并更换系统组件前，应该首先测试怀疑的组件，这是由于更换主要元件时系统需要额外的停机时间。常规欧姆表可以发现主要短路以及线路或绕组断开故障，但不能测量电阻值较高的情况，绝缘电阻表则可以。

11.8.4　何时使用钳形电流表进行故障诊断

钳形电流表是很有价值的故障诊断工具，可以显示电路中存在的电流。例如，如果怀疑有三相电压供电的电动机有一个熔断器烧断，可以在有电时通过用钳形电流表测量每一相的电流，快速地确定哪一相熔断器烧断。熔断器烧断的一相会显示

0A，熔断器完好的两相将显示比电路额定值更高的电流，这是由于无法起动，电动机将会吸入转子堵转电流。该测试比测试熔断器熔断时反馈电压引起的电压降落更有效。这种情况下的测试只能持续几秒，否则剩余熔断器会通过很大的电流直到其中一个烧断。

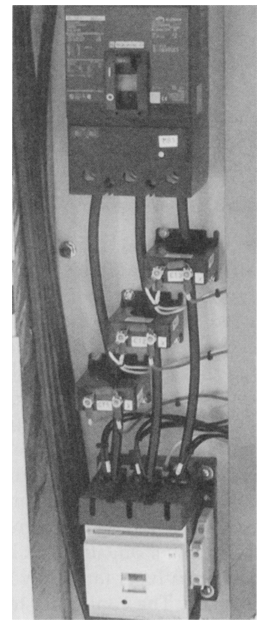


图 11-28 用于测量主电缆电流的电流互感器

钳形电流表对于确定任何电力线路的电流负荷也是非常有用的。这点对于确定电力线路是否超载尤其有用，超载将导致熔断器烧断。也可以判断电动机是否开始磨损、轴承损坏或缺乏润滑。如果电动机电流大于额定值，可以怀疑超载。如果负荷在容许范围内，可以怀疑电动机润滑或轴承出现问题。钳形电流表对于测量风力发电机输出电流也非常有用。许多风力机有安装在其配电柜上的专用电流表，这些电流表使用电流互感器。电流互感器看起来就像一个圆环，套在来自中性点不接地发电机的主接线上。互感器检测线路的电流值，再通过电子电路把小感应电流转换成系统测量需要的精确电流。图 11-28 表示了风力机电气柜的三相电流互感器，来自风力发电机的每一个主电源线经过一个电流互感器。这 3 个电流互感器使得系统电流可测，并且显示每条线路正确的电流值并将其发送到 SCADA 系统，因此可以不断监控或记录供日后使用。风力发电机在任何时刻的电流值表明了从风能转化而来的能量大小。

11.9 液压故障诊断

一些风力机采用液压系统来控制风力机桨叶节距、偏航制动系统、高速轴制动系统、转子和轮毂锁定系统，以及在高风速中减缓风力机叶片转动的气动制动系统。图 11-29 表示了风力机的一个基本液压系统。液压系统包括通过电动机驱动的液压泵、保存液压油的储油罐、减压阀、方向阀、流量控制阀以及驱动器如液压缸或液压马达。液压系统有储存在储油罐里的液压油，液压油很干净，这是由于泵压时，液压油会通过一个或多个过滤器。

减压阀、方向阀以及流量控制阀可由手动或电磁阀控制，电磁阀本质上是一个线圈，当电流通过时成为一个强力磁铁。电磁阀使得液压系统可由 PLC 或计算机控制系统控制。电磁阀可在开/关模式下由控制器控制，或者在较大的风力机中也可以是模拟方式，这意味着其可以从 0 ~ 100% 控制阀的开度。第二种类型的液压阀也称为比例阀，在其中放入一个反馈传感器，成为伺服阀或伺服系统，更加精确地控制一些阀门。

对液压系统进行故障诊断时，问题通常表现为执行机构不能正常工作，如活塞杆不能伸缩，也可能是执行机构移动速度不够快。液压系统有压力表，可显示每个液压回路各点的压力大小。这些可能包括由 PLC 或计算机显示给 SCADA 系统的读数，技术人员可以很容易地检查它们。对液压系统进行故障诊断时，可以使用压力读数和液压图来确定引起故障的原因。

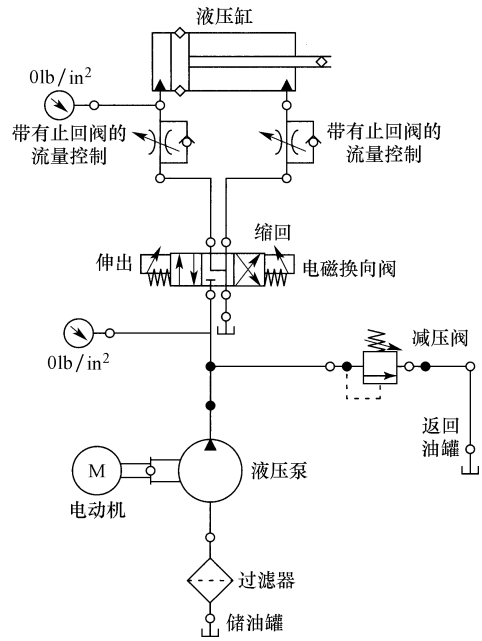


图 11-29

液压系统的第一个测试是确定系统是否有足量的液压油容量以及液压泵是否正在推动液压油产生流量和压力。只有当液压油充满了软管、管道、阀和执行机构，系统中才会有压力。系统压力的大小取决于减压阀的设置值。如果压力表显示系统的压力是零，首先测试以确保电动机在拖动液压泵并且有足够的液压油。有可能电动机轴转动，但是电动机和液压泵之间的耦合损坏了，也有可能是液压泵损坏不能推动液压油来产生压力并使执行机构正确地移动。

如果压力表显示适当的压力，可以假设泵和电动机工作正常。故障诊断过程的下一步是试图使执行机构移动。如果执行机构是一个液压缸，当电气命令发送到方向阀电磁铁，其应该能够伸缩。如果电磁铁接收到电信号，液压缸没有移动，可以通过在旁边放一个小金属螺钉来检查电磁线圈是否有磁性。如果电磁铁有磁性，金属螺钉将被吸引。如果没有，问题应该是电磁线圈断开，或者电信号没有到达电磁线圈。可以通过移除连接在线圈上的电线并用欧姆表测试线圈的连续性来测试电磁线圈是否断开，还可以检测线圈上的两条电线间的电压，观察其是否接收到电信号。

如果方向阀电磁线圈接收到信号并且是有磁性的，可以通过在阀芯末端放一个小螺钉观察其是否改变位置来检查阀门是否改变位置。如果阀门改变位置，液压油可以流向液压缸使液压杆扩伸。在上面加上全部压力，如果液压杆没有移动，可能会怀疑活塞杆卡在某处。由此可见，使用系统的方法，可很容易对液压系统进行故障诊断。

11.10　风电系统的周期性维护

风力机的周期性维护包括一系列的目测检查、小型测试以及按照计划进行的检

查。进行检查的时间表由运行小时数或日历期限决定，哪一个条件满足以哪一个为准。找到以前的检查日期或上次检查后风力机运行小时数，通过检查维修日志确定何时进行下一次测试。一些风力机通过其 SCADA 系统提供该信息，这样该系统可以提前确定由于检查而停产的时间。

大多数风力机制造商在其服务手册中概述了需要进行测试且在周期性维护过程中可观测的系统部分。手册提供了一个表格，包括进行特定的周期性维护的日期和时间。例如，可能需要若干小时检查一次齿轮箱油，然后一定小时后更换油。大多数风力机制造商提供了一个完整的材料，其中包括应该检查点的测试清单以及应完成的测试。

周期性维护在具体运行时间或日历日期的基础上进行，这是由于风力机的基础零件制造商有其运行测试以及这些零件何时发生故障的历史数据。例如，齿轮箱的齿轮和轴承已经过全面测试，并且制造商们已经知道磨损前齿轮箱的零件能运行多久。制造商们也知道润滑油在恶化前可以使用的小时数。这些零件的历史数据可以帮助制造商确定需要检查什么，以及在零件寿命期限内在特定的日期需要更换什么。周期性维护的必要性在于，在风力机发生重大故障前，定期检查的服务费用比较便宜。如果风力机发生重大故障必须停机，直到确定故障的原因并作出修理。如果包括采购及零件运输，可能会增加数天的停机时间，从而导致风力机停止服役并且长期不能发电。

风电机组有周期性维护计划时，任何需要更换的零件可以提前一两个星期订购和发货，因此在需要时可以随时更换。这可以减少停机时间，使过程更容易控制。按计划对机械零件、轴承和齿轮提供适当的润滑比导致其完全故障更加经济。如果机械系统、轴和齿轮箱得到恰当地维护、检查和润滑，可持续运行 5 年或 10 年。

周期性维护的主要问题之一是确保完成测试的技术人员安全以及风力机安全。OSHA 文件规定了维护风力机必须遵循的程序。例如，技术人员正在检查时，叶片必须停止并且以某种方式制动。技术人员如果必须爬上塔架或离开地面检查时，必须有适当的个人防护设备，包括安全带及绳索。大多数风力机制造商已经确定了在周期性维护时必须遵循的安全流程。安全问题至关重要，并且要按期组织周期性维护人员召开安全会议。

对大型、中型或小型风力机进行周期性维护时，要求使用技术服务手册中规定的合理润滑。在维护之前必须获得适当的润滑，因此要更换所需的润滑剂，如润滑油或液压油，并且在整个系统的润滑点添加油或润滑脂。获得技术手册规定的润滑至关重要，这是因为制造商已经确定了可以使得系统长期运行在最佳性能的润滑油的品牌和重量。

许多制造商提供了详细的风力机润滑点的图表或照片，其中包括转子和轮毂、叶片根部、轴的万向节、沿着齿轮箱一些位置的润滑孔。一些较大的风力机有自动

润滑系统以及一个必须定期填满的油箱，以确保其能够正常工作。

一些服务手册提供了周期性维护所必须遵循的详细测试清单。遵循测试清单上规定的测试顺序很重要，这样就不会跳过任何重要的测试环节。提供该顺序是非常必要的，一个例子就是移除安全盖时，可以对一定区域做所有的检查和测试。如果没有按顺序完成测试，可能要移除或检查安全盖，并且做完一个零件的检查就要更换一个。以后发现需要在这一区域做进一步检查，将不得不再次打开盖板，由于需要第二次移除并替换盖板，将会花费更多的时间。

周期性维护检查可以分成几个部分。例如，有必须在塔架上做的检查，以及为塔架提供支撑的牵索所做的完整检查和测试。另一系列测试包括机舱内和地面上的电气系统。最后一系列测试包括所有机械和旋转部分，如偏航控制系统、风力机叶片、桨叶节距系统、转子和轮毂、低速轴、齿轮箱、高速轴以及发电机。此外，这些测试还包括检查任何部分的制动系统。

塔架上的维护包括目测检查将塔架各部分组合在一起的硬件，如螺母、螺栓或铆钉。该检查还确保任何组成部分没有裂缝。进一步检查这些部件的腐蚀也是必要的。如果存在这些问题中任何一个，服务手册将指出需要进行的维护类型。如果塔架嵌入或附于混凝土板上，需要检查混凝土板，以确保其没有老化，并且固定塔架的螺栓没有松动。如果风力机安装在淡水或咸水水面上，还需要额外的检查，查找在该环境中可能发生的腐蚀。

周期性维护检查还包括风力机叶片的目测检查。这包括检查是否由于鸟击、雷击或冰冻等原因损坏了叶片。技术人员还必须检查由于日照造成的叶片老化。

当关闭电源并进行警示后，必须进行一些电气系统的周期性维护。系统断电后必须用电压表进行额外测试，以确认电源是关闭的。在这一点上，周期性维护检查程序可能要求对面板上的每个电气连接进行物理测试，并确保其是紧固和安全的。这需要用螺钉旋具或扳手对每个连接点进行物理测试，以确保其是紧固的。其他维护内容需要打开电源，进行一系列电压或电流测量，以确保该系统正常运行。

液压系统的周期性维护包括检查液压油位，检查液压油状况和更换液压油过滤器。风力机运行多年后，要求采集油样送到实验室进行分析，以确定油中金属粒子的来源，这将表明泵或阀中的轴承或移动机构是否开始出现故障。如果该测试的结果表明系统的泵或者其他部分发生故障，需尽快订购零件并更换。每次计划的周期性维护不会要求做相同的测试和检查。在一段时间间隔内只要求检查液位，在更长的时间间隔内则要求更换这种液体。

关于周期性维护要记住的一点是合适的时间和计划，这将避免系统磨损并且保持停机时间最短。有些技术人员认为允许延长一段时间或超出制造商的规定进行周期性维护，或跳过部分维护程序，认为这样能节省时间和金钱。实际上，如果不如期按计划完成周期性维护，花费成本和停机时间最终将相当多。

11.11 风力机大修

有时风力机可能会遭受重大故障，这需要对系统进行大修。此外，风力机都有运行寿命，由年数或运行小时数决定和规定。由于风力机运行到使用期的终点，风力机的某些部件需要更换，这就是所谓的大修。大修包括更换叶片、轴以及驱动系统。这种类型的检修理念是基于以下事实：更换系统消耗和磨损的主要部分比让风力机完全故障更加便宜。由于塔架不像移动组件那么容易磨损，其寿命可能是移动组件的两倍，所以更换某些驱动部件和发电机比更换风力机更加经济有效。

系统使用期结束时，风力机的各个子系统也需要大修。例如，发电机是风力机中比其他部分磨损更快的设备，拆除和更换发电机是大修中的一部分。如果拆除和更换发电机，风力机将可以比最初设计寿命多运行几年。风力机大修的另一个特点是所有的主要零件可得到保证，基本上给了所有者一个新的系统。这已成为一种经济有效的方法，使得风力机可以在更长一段时间内服役。

有时可以拆除风力机的整个机舱并拿去检修和翻新。由于检修过程需要数周或数月，一个新的或一个已翻新机舱可立即放在塔架上。这种检修类型称为更换，因为其允许更换风力机的主要零件，并在其位置上安装新的或翻新零件。这使得风力机花费最短的停机时间重新投产。这也使得检修队可以在车间里可控的环境下以较慢的节奏进行测试和更换零件。该过程还使得旧系统以更低的成本得到翻新，并提供一个或多个储备着用于更换的机舱。许多检修设施有测试系统，在叶片没有连接到转子上时可以把主轴装在机舱里。这使整个传动系统和发电机可在车间可控环境下进行检测，使得技术人员能够在把机舱安装到塔架和连接叶片前保证其功能。当机舱还在地面车间里时，如果技术人员发现任何问题更容易解决。可以给发电机接上用电负荷或通过连接到电网使其满负荷运行。技术人员检查传动部件、齿轮箱以及满负荷的发电机，并对轴进行校准和振动检查，以确保安装在塔架上后系统能够满功率运行。若该检修过程未在受控环境中完成，可能会花费更长的时间，并且不是很有效。

简 答 题

1. 列举为新风力机安装所进行的场地准备的步骤。
2. 若压力表显示系统压力为零，列举需要测试的液压系统的基本零件。
3. 识别风力机从转子到发电机的驱动系统部件。
4. 说明风力机大修的优点。
5. 解释为何坚持严格的周期性维护计划对于延长风力机寿命至关重要。
6. 指出风力机安装过程中，当风力机还在地面时应做的事情。

7. 解释风力机还在地面时，若风力机叶片安装到转子上时应注意的事情。

8. 解释为什么塔架竖立后机舱要安装在风力机的塔架上。

9. 解释对风力机进行故障诊断时，测试风力机哪些部分运行正常为何至关重要。

10. 说明对风力机电气系统进行故障诊断时，何时使用电压表、欧姆表以及钳形电流表。

选　择　题

1. 风力机场地准备包括（　　）。

a. 确保道路畅通使得风力机及其零部件能到达场地

b. 挖掘基座和浇筑混凝土

c. 确定最近并网点

d. 以上全部

e. 只有 a 和 c

2. 风力机叶片（　　）。

a. 对于小型或中型系统，当塔架还在地面上时可以安装在转子上

b. 对于大型系统，当塔架已经竖立并且机舱安装完成后可以安装在转子上

c. 在安装过程中需要极其谨慎地处理

d. 以上全部

e. 只有 a 和 c

3. 塔架竖立前，如果风力机叶片安装到转子上，（　　）。

a. 塔架竖立时，叶片必须确保与塔架之间的安全。

b. 塔架竖立时，叶片必须可以自由旋转。

c. 塔架竖立前，只有一个叶片可以安装到转子上。

d. 塔架竖立前，风力机叶片不能安装到转子上。

4. 在小型和中型风力机中，来自发电机的电缆（　　）。

a. 应该在塔架在地面上时穿过塔架

b. 直到塔架竖立以后才能安装

c. 小型和中型风力机的发电机与地面配电柜之间不需要电缆

d. 应该用绳子从地面拉到塔架顶

5. 塔架在地面上时，如果安装了风力机叶片，（　　）。

a. 叶片连接上，塔架会弯向一侧

b. 塔架不需要支撑，因为叶片可以碰到地面并且不会损坏

c. 塔架必须支离地面足够高以便叶片安装时不会碰到地面

d. 还在地面上时，风力机叶片不能安装到塔架上

6. 配电柜上的电流互感器用来（　　）。

a. 感应系统产生的电流

b. 感应系统产生的电压

c. 感应系统的电阻

d. 感应风力机叶片的转矩

7. 对风力机组件进行故障诊断的最好方式是（　　）。

a. 检查每个独立零件以确保其正在工作

b. 进行测试以排除大部分运行正常的系统

c. 关闭电源并目测检查所有部分

d. 注意以前发生过故障的部分

8. 症状和故障之间的区别是（　　）。

a. 如果修理症状，实际上修理了系统。

b. 症状和故障完全相同。

c. 症状如熔断器熔断，可能导致系统停止，但是并没有表明什么原因导致了故障。

d. 只需寻找症状，因为其通常与故障相同。

9. 检修风力机（　　）。

a. 只是提前周期性维护

b. 可节省大量钱并延长风力机寿命

c. 比安装全新的系统更贵

d. 应该在系统第一次安装启动前进行

10. 对电气系统进行故障诊断时，（　　）。

a. 必须始终关闭所有电源。

b. 有时必须需要系统有电，这样可以发现由于组件哪里断电造成故障。

c. 找到所有故障最好的方法是断电时检查整个系统的连续性。

d. 以上全部。

第 12 章　风力机的电气与电子基础知识

本章学习目标

读完本章后你将能够：

- 解释术语“电压”。
- 解释术语“电流”。
- 解释术语“电阻”。
- 理解欧姆定律以及如何用其计算电压、电阻和电流。
- 阐述电气接线图的功能。
- 阐述电气梯形图的功能。
- 解释为什么并联支路电压相等。
- 介绍用于计量单位的符号 M、k、m 以及 μ，并提供如何使用每个计量单位的例子。
- 解释术语“无穷大电阻”。
- 列举用电阻表测量电阻的两点注意事项。
- 解释在测量未知电压或电流时，为什么应将电压表和电流表量程调至于最大挡。
- 解释 P 型和 N 型材料是由哪两种材料结合形成的。
- 说明二极管（PN）结的工作原理，并了解输入交流波形和（经过整流后的）输出直流波形。
- 识别单相和三相全波桥式整流器。
- 解释电力电子变频器（逆变器）的工作原理。

本章关键词

闭合开关（Closed switch）
线圈（Coil）
接触器（Contactor）
二极管（Diode）
熔断器（Fuse）
熔断器断开（Fuse disconnect）
逆变器（Inverter）
梯形图（Ladder diagram）
发光二极管（LED）（Light-emitting diode）
电动机起动器（Motor starter）
N 型材料（N-type material）
常闭（Normally closed）
常开（Normally open）
开路（Open circuit）
开断熔断器（Open fuse）
开断开关（Open switch）
超载（Overload）
并联电路（Parallel circuit）
P 型材料（P-type material）

电源电路（Power circuit）
整流器（Rectifier）
继电器（Relay）
原理（梯形）图［Schematic（ladder）diagram］
串联电路（Series circuit）
串-并联电路（Series-parallel circuit）
开关（Switch）
变压器（Transformer）
晶体管（Transistor）
电压降落（Voltage drop）
接线图（Wiring diagram）

本章概述

作为一名技术人员，必须完全了解电（能），这样才能对风电系统的电气元器件进行故障诊断，如发电机、开关和控制器。本章介绍了电力基础知识，这为日后学习复杂的电路打下基础。理解本章不需要任何以前的电力知识。最简单的电能形式是直流电，因此本章中很多例子使用的是直流电。然而，该领域设备中的大部分电气元器件和电路使用的是交流电，因此有些例子使用交流电。本章首先定义了基本术语，如电压、电流和电阻，并表明了它们之间的简单关系。

12.1 基本概念及简单电路

如果联系认识的工作电路，很容易理解电力基本术语。例如，使用电动机驱动传送带，电动机必须有电压和电流源。电流是电子流，电压是使电子流动的动力。这只是一个介绍，更多相关术语将在本章后面介绍。

如图 12-1 所示，该电路的电压源是 110V，由 L1 和 N 确定。开关是手动式开关，提供了打开和关闭电动机的方法。当开关移动到“ON”的位置，或闭合位置，电压和电流通过导线到达电动机。电压和电流到达电动机时，其轴开始转动。电路中的电线称为导线。导线为电压和电流提供路径，并且其对电流阻力很小。这种阻力叫作电阻。

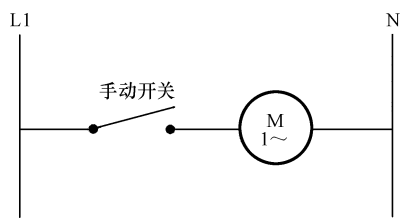


图 12-1 控制电机的手动式开关电路图

电动机运行一段时间后，断开开关，电压和电流在开关处中断，电动机关闭。当开关再次闭合，电压和电流再次到达电动机。现在对基本术语电压、电流以及电阻有了初步了解，接下来可以准备学习更多有关知识。

使电动机轴转动的能量称为电能，电定义为电子的流动。在前面的讨论中，电流的定义也是电子的流动。在许多情况下，电和电流可以互换使用。电子是原子中带负电的部分，而原子是所有物质的基本组成单元。一切物质都是由 118 种元素的某种元素组成的。组成电气元器件和电路的两种常用元素是用于电线的铜以及用于制造很多组件（如电动机）的铁。

要在这一点上理解电，只需要了解原子有三部分：带一个负电荷的电子，带一

个正电荷的质子以及不带电的中子（也称为电中性）。图 12-2 是一个最简单的原子的结构图，有一个电子、一个质子和一个中子。从图中可以看出，质子和中子在原子的中心位置，原子的中心称为原子核。电子在轨道上围绕原子核转动，如地球围绕太阳转动一样。

由于电子带负电，质子带正电，这种电荷之间的吸引力使得电子在轨道上围绕原子核运动，直到有足够的能量，如热能、光能或磁能，激发电子使其可以自由流动。电子一旦打破了围绕质子的运动轨道来自由流动，就称为电流。只有电子不受原子束缚可以自由流动时，才会产生电流。

图 12-2 所示的原子是氢原子，只有 1 个电子。图 12-1 中的电路，铜线是为电到达驱动传送带的电动机提供路径的。由于铜是最常见的电路导线构成元素，对铜原子的研究很重要。铜原子不同于氢原子，铜原子有 29 个电子，而氢原子只有 1 个。为电动机提供电流通路径的铜导线包含数百万个铜原子。

如图 12-3 所示，铜原子有 29 个电子，在一系列轨道上围绕原子核转动。由于原子有很多电子，其不会都在同一轨道上运动。相反，铜原子有 4 条轨道。这些轨道被称为电子层。还有 29 个质子在铜原子的原子核里，因此带正电荷的质子将吸引带负电荷的电子，并使电子保持在合适的轨道层。原子核对最接近它的三层电子的吸引力很强，以至于这些电子不能被激发产生电流。唯一能被激发的电子是原子最外层的电子。最外层称为价电子层，价电子层的电子称为价电子。铜原子的价电子层只有一个电子。所有良好的导体都具有很少的价电子。例如，黄金是最好的导体之一，只有一个价电子，银也是一种良好的导体，有 3 个价电子。

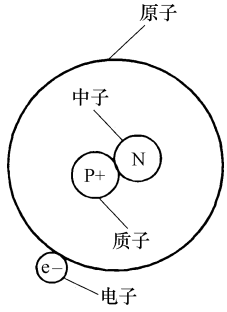


图 12-2　包含电子、质子和中子的一个原子

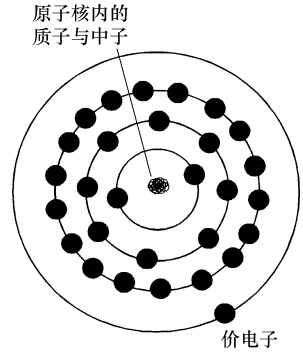


图 12-3　一个铜原子有 29 个电子。该原子有一个电子在其价电子层，可以激发产生电流

之前研究过的电动机电路中，大量电能以电压的形式施加在铜导线的铜原子上。电压是导致每个铜原子的价电子激发并开始自由移动的动力。自由电子实际上从一个原子移动到下一个原子，这种运动称为电子流动，更确切地说，称为电流。由于铜导线有数百万个铜原子，如果研究其中 3 个原子中的电子流动更容易理解。

图 12-4 展示的是电子从 3 个独立的铜原子中被激发和流动的过程。

电子从一个原子被激发走，留下了一个空间，叫穴，是电子以前的位置。这个穴将吸引来自最近原子的自由电子。电压导致电子移动，然而每个电子只能移动至相邻原子产生的穴。这意味着电子是通过从一个穴到另外一个穴的方式在导体中移动的。该运动看起来像是高速公路上一辆挨一辆的汽车。

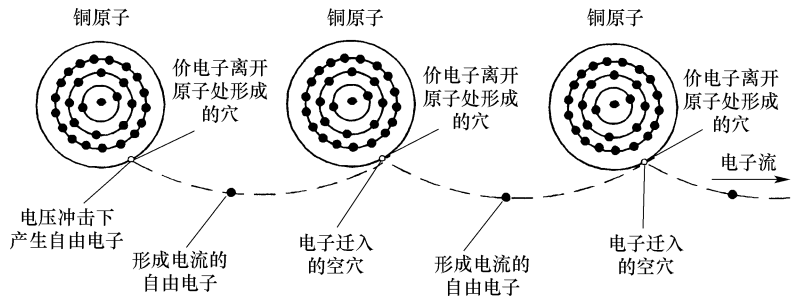


图 12-4 电压是使电子从其轨道激发的动力。在该图中，最右边的原子价电子激发并留下一个穴。该原子中的电子到第一个原子左边，从一个穴移动到另一个穴产生电流

12.1.1 电路中电压示例

电压是电子在电路中移动的动力。图 12-5 表示了两个相同的灯泡连接到不同电压源时电路电压的影响。连接到 12V 电源的灯泡比连接到 6V 电源的灯泡更亮，原因是因为 12V 比 6V 能提供给电路中的电子更大的动力，较高的电压也将导致更多的电子流动。

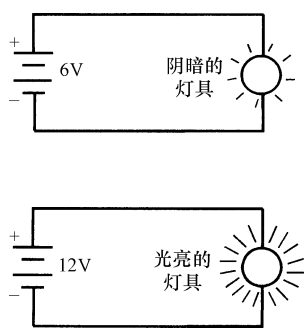


图 12-5 施加不同电压的两个相同的灯泡。施加 12V 的灯泡比施加 6V 的灯泡更亮

电动机的原始图中，电压值是 110V。产生这种动力的能量来自发电机。发电机轴由蒸汽等能源驱动，蒸汽是通过燃煤或核反应加热水到其沸点产生推动发电机轴旋转的能量。此外，发电机也可以由来自水流过大坝时的动能来驱动。灯泡的例子中，电压来自电池。电源最初充电时，电能以化学能的形式储存起来。电路中的电压值越大，激发电子并使得更多电子流动的动力越大。电压的学名是电动势（EMF）。

12.1.2 电路中电流示例

电流的定义是电子的流动。任何时候电路中流动的电子实际数目是可数的，并且其数量非常大。电流的单位是安培（A）。安培通常缩写为安。1A 等于每秒有 6.24×10^{18} 个电子流过一点。图 12-6 表示了流动电子数等于 1A 的例子。在该图中，可以看到流动的电子是可数的；当 1s 有 6240000000000000000 个电子通过一点，称为 1A。安培作为电流单位用于所有的电气设备中，如电动机、水泵以及开关。

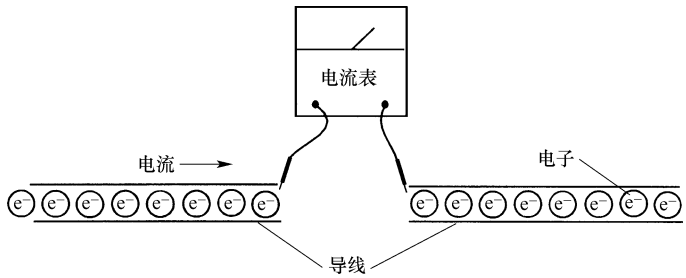


图 12-6　电子通过测量点。当每秒流动的原子数量达到 6240000000000000000 测量电流为 1A

12.1.3　电路中电阻示例

电阻定义为对电流的阻力。电阻存在于用作导体的电线以及包裹电线的绝缘层中。电阻的单位是欧姆，或 Ω（希腊字母欧姆，代表了字母 O）。材料的电阻很大时，被认为是绝缘体；如果电阻非常小，则是导体。

导体有很小的电阻，使得电子不需要很大动力就可以通过。包裹电线的绝缘层有很大的电阻，使得电子不能从一根电线移动到相邻的另一根电线。绝缘可以确保手里的工具如电钻或电锯的电线可以被触摸，电线中流动的电子不会击到使用工具的人。电阻大到可作为绝缘体的材料有橡胶、塑料和空气。

电路中的电阻值可以调整，以提供有用的功能。例如，熔炉加热元件被制造成一个特定的电阻，使得当电子流过时会被加热。同样的观念用来确定灯泡灯丝的电阻值。100W 灯泡的灯丝电阻约为 100Ω；100Ω 电阻足以使得电子很难通过灯丝，这将导致灯丝加热到其发光点。电路中的电阻被设计用来转换能量时，如加热元件或电动机，称为负荷（负载）。

12.1.4　识别电路的基本组成部分

每个电路必须有一个电压源、为电子流动提供路径的导体以及至少一个负荷。该电路也可能有一个或多个控制环节。图 12-7 是一个典型电路，有电压源、导体、控制环节以及负荷。在该电路中，电压源由 L1 和 N 端子提供，负荷是一个电动机，将电动机连接到电压源的两根电线是导体。手动开关是控制环节，控制流向电动机的电流。大型风力机中，可以有一个以上的负荷，例如，系统可能有多个液压泵。后面将介绍更多有关这些组件的知识。

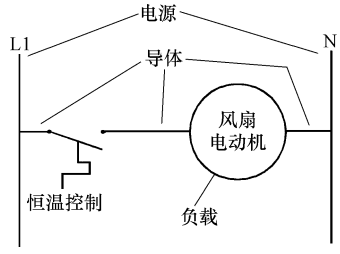


图 12-7　电路的基本组成部分：电源、导体、控制环节和负荷

12.1.5　接线图和梯形图

图示电路有两种基本方式：接线图或梯形图。接线图显示了电路的组成部分，就像给电路拍照所看到的样子一样。梯形图显示了所有组件的动作顺序。图 12-8

表示了一幅有两个开关和一个灯的接线图。开关和电线都显示在其在照片中的位置。接线图可以帮助人们知道组件在电气柜中的位置以及端子的位置。安装电路元器件时，这一点很重要。如图 12-9 所示，相同的电路，但这次绘制的是梯形图。梯形图清楚地表明，这两个开关并联接线，每一个都可以打开灯。这就是所谓的显示动作顺序。在接线图中，可能很难确定开关的连接是串联还是并联，而在梯形图中很容易看出开关是如何动作的。不能说哪一种图比另一种更好，而是在适当的时间选择适当的图。可以看出，从一种图类型转换到另一种很容易。

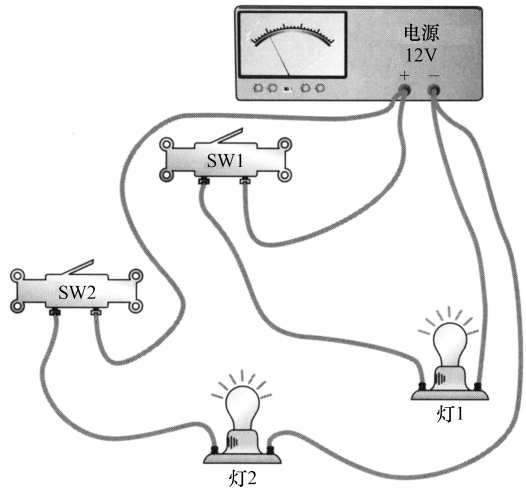


图 12-8　两个电路并联的接线图

12.1.6　将电比喻为水系统

如果把电想成一个系统，如水系统，会更加熟悉、更容易地理解电。例如，当水流过软管时，水流相当于电流（A），水压相当于电压。如果踩在软管上或者使其末端弯曲，会产生一个阻力延缓流动，就像电路中的电阻减慢电流的流动。图 12-10 表示了水系统和电路之间的相似性。

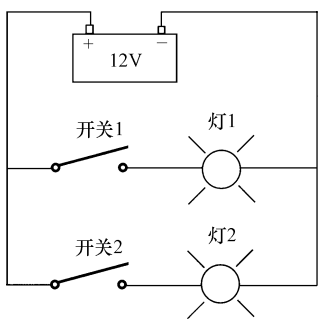


图 12-9　两个均带有一个开关和一只灯泡的电路并联时的梯形图

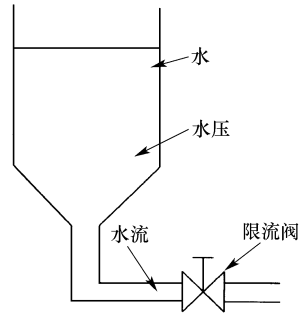


图 12-10　显示水系统和电气系统之间相似性的图。水流类似于电流（A），水压类似于电压，来自阀门的阻力会导致水流减缓，就像电力系统中的电阻导致电流减缓一样

根据定义，1V 电压是推动 1A 的电子通过 1Ω 电阻的电路所需要的力量。此外，1A 是 1V 电压时流过 1Ω 电阻的电路的电子数，1Ω 是 1V 电压引起 1A 电流流动的电阻值。由此可见，电压、电流和电阻可以由彼此之间的关系来定义。

12.2　电压、电流与电阻的测量

对风力机系统电路中的电压（V），电流（A）以及电阻（Ω）进行测量非常重要，这样就能确定其何时运行正常或发生故障。如果正在检查汽车轮胎，可以通过简单的观察，观察轮胎是不是扁的。由于电子流通过导线是看不见的，不可能简单地看导线确定其是否有电压，或者是否有电流通过，因此必须使用仪表来测量电压、电流和电阻。

12.2.1　测量电压

用于测量电压的仪表叫电压表。图 12-11 和图 12-12 显示了两种类型的电压表。图 12-11 中的表称为模拟式电压表，因为它使用指针和比例刻度显示被测电压值。图 12-12 中的表称为数字式电压表，因为它以数字形式来表示被测电压值。

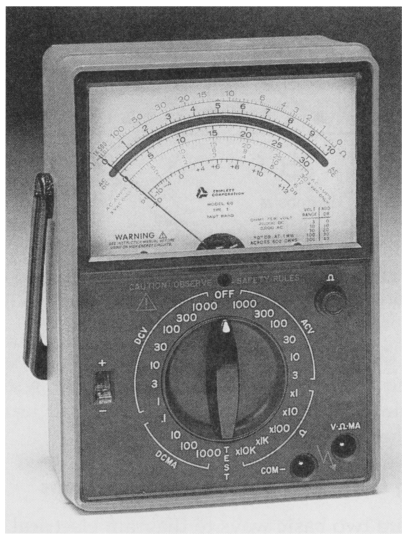


图 12-11　模拟仪表有一个通过磁场移动的指针。仪表的表盘显示测量量程，前面的旋钮用于确定被测的是电压、电流或者电阻以及仪表测量值的范围（图片来源：Triplett 公司）

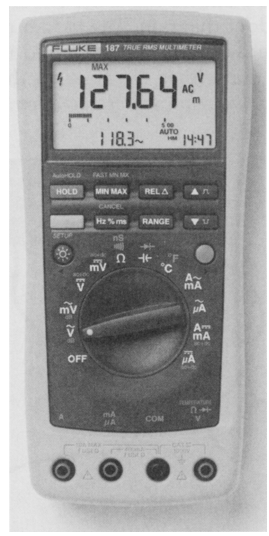


图 12-12　数字仪表具有数字显示，显示被测量的电压、电流或电阻值。有些数字仪表有一个旋钮来选择电压、电流和电阻的范围，而有些则是自定范围（图片来源：Fluke 公司）

电压表有很高的内阻，约为 20000Ω/V，因此其探针可以安全地直接放在电源的端子上而不会损坏仪表。范围选择开关通过调节仪表的内阻来设置电压表可以测

量的最大值（量程）。电压表可以用于进行许多不同场合的电压测量。例如，可以测量系统中的电源电压以及提供给每个负荷的电压值。图 12-13 表示了电压表的探针应放在哪里可以安全地测量电路中的电压。图 12-13a 中，电压表探针放在电源端子上测量电源电压值。图 12-13b 表示了测量灯 1 电压时电压表探针的合适放置位置，图 12-13c 表示了测量灯 2 电压时电压表探针的合适放置位置。在每种情况下，电压表探针都放在测量电压处的端子上。

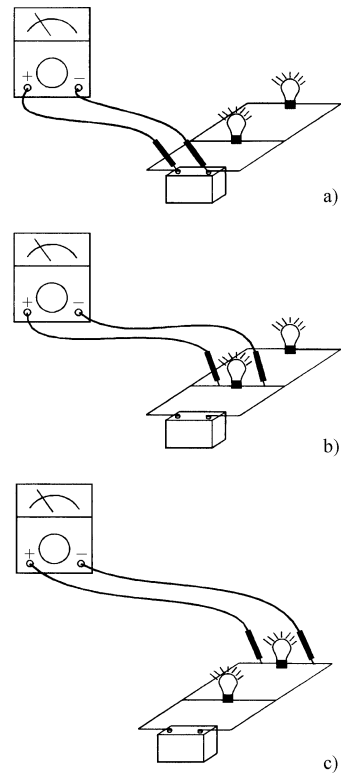


图 12-13　a）测量电源电压值放置电压表探针的正确方法　b）测量灯 1 电压放置电压表探针的正确方法　c）测量灯 2 电压放置电压表探针的正确方法

安全注意事项：进行电压测量时必须当心，否则会有触电危险。工作的电路带电时，必须非常谨慎，这样进行电压测量时，才不会接触到裸露的导线端子。

12. 2. 2　测量大电流和小电流

图 12-14 所示的表称为钳形电流表，用来测量较大交流电路中的电流（有些钳形电流表也可以测量直流电流）。从图中可以看出，这种类型的表有两个爪或颚，当闭合时在顶部形成一个圆圈。按下仪表上的按钮，会使爪打开，这样不用断开电线就能环绕电线。钳式电流表的爪实际上是一个变压器，通过电磁感应原理测量通过导线的电流值。电流通过导线时，会产生一个由磁力线组成的磁场。由于交流电压极性每隔 1/60s 变化一次，变化的磁场产生一个通过电流表爪部变压器的小电流。这个小电流通过仪表的移动测量，读数表明仪表夹住的导线中流动的实际电流。因此，钳形电流表一次只能测量一根导线中的电流。如果钳形电流表一次连接到一根以上的导线周围，一根导线中的电流可能消除其他导线中测量的电流，这将导致电流表测量为 0A。钳形电流表测量交流电流有几个范围，因此可以测量较小的电流（小于 10A）和较大的电流，如超过 100A 的电流。如果想测量非常小的交流电流值，可以将导线在爪上缠两三次。如果使用两个线圈，会导致测量的电流值乘以 2，如果使用三个线圈，会导致测量的电流值乘以 3。增倍测量使得电流表在测量较小的电流时更加准确。

还有一种版本的钳形电流表可以测量直流电流，这种类型的仪表专门用于测量直流电流。

用来测量电流的电流表可能是模拟式或数字式。数字电流表用来测量小于 10A 的电流。这种类型的电流表被做成称为 VOM（万用表）的特殊仪表，可

以测量电压、电阻或微小电流。当表用来测量电流时，实际上是用于读取很小的电流，如 1/1000A，称为一毫安，也记为 0.001A。（前缀“毫”的意思是千分之一。）图 12-15 所示的是万用表测量熔断器的电阻。如图 12-11 表示了一个模拟式万用表，当感应到电流时引起指针偏转。电压施加于万用表上时，必须通过电阻将其转换成实际流经仪表动作装置的电流。万用表设置为测量电流或电阻时，使用相同的仪表动作装置。仪表随着测量电压、电流或电阻唯一改变的部分是限制流经仪表动作装置的电流值的电阻范围。

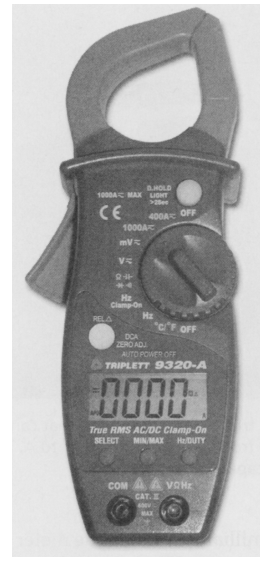


图 12-14　用于测量大电流的数字钳形电流表（图片来源：Triplett 公司）

12.2.3　测量毫安级微小电流

由于有的情况下电流值远小于 1A，有时需要测量电路中的毫安级微小电流。例如，可能需要测量液压电磁阀使用的电流值，以确保其工作正常；有时还需对风力机控制系统中的固态控制面板进行微小电流测量。测量微小电流最重要的一点是，电流表必须串联在需要测量电流的位置。由于仪表串联在测量电流的位置，必然要产生开路。如图 12-16 所示，当进行微小电流测量时，电路中产生一个开路点，毫安表端子应该放在电路断开位置的导线上。移除来自电源的导线中的任一条可以产生开路。仪表的一个探针放在电源端，另一个放在从电源拆下的导线末端。这样使得仪表串联在电路中，电路中流动的所有电子必须通过仪表，因为仪表已成为电路的一部分。

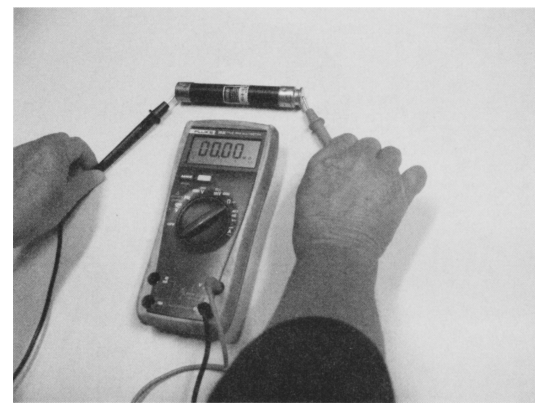


图 12-15　一个真实的 RMS 数字万用表，可读取电压、电阻、从毫安到 10A 的电流，也可测量温度和电容（图片来源：Triplett 公司）

由于电流表必须成为电路的一部分来测量电流，故其必须具有非常小的内阻，这样几乎不会改变电路的总电阻。当万用表设置为毫安表时很容易损坏，因为其内阻很小。

安全注意事项：一旦错误地将仪表置于电流挡来测量电源两端的电压时，仪表将受到严重损坏。当设置为测量电流时，电阻非常小，仪表可能会爆炸或灼伤使用者。这与拿一根裸金属丝并使其弯曲，将其插入电源插座的两个孔类似。正在进行电压、电流或电阻

测量时，必须时刻检查仪表的设置。

作为一名技术人员，要求同时会使用毫安表和钳形电流表。毫安表用于测量小电流，钳形表用于测量较大电流，如电动机电流。如果电动机电流过大，就可以判断其超载，并很快会发生故障。

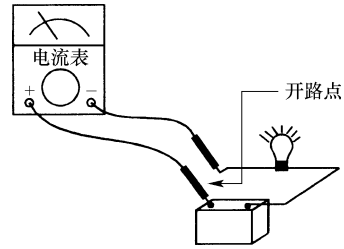


图 12-16　进行电流测量时仪表探针的正确放置方法

数字万用表以及一些模拟万用表既可以测直流又可以测交流。这些类型的仪表测量范围小至几毫安，大至 10A。

12.2.4　用数字万用表进行测量

用数字万用表进行测量时，应该遵循与使用模拟万用表相同的规则。主要的区别是，其测量结果以数字呈现。使用者需要做的是观察选择开关的范围，以确定测量单位以及使用所显示的测量值。如果电压或电流是直流，一定要注意极性（+/−）。有些数字仪表还提供了一个用于电阻测量的声音信号，在定位多芯电缆线时非常有用。

12.2.5　用数字万用表测量电阻及传导连续性

使用数字万用表测量电阻有好几种用途。例如，可以使用数字表测量传导连续性，即判断熔断器、开关等器件的电阻为零或无穷大。如果熔断器是零电阻，认为其是完好的；如果是无穷大电阻，认为其是断开的。使用数字电压表测量连续性时，开始测量前首先应该看看仪表引线和端子是不是完好。可以从将仪表的两个引线短接开始，这代表零电阻，并且仪表应显示为零或接近零欧姆。将仪表的两个引线短接时，如果仪表显示零欧姆，这意味着仪表是好的，引线是好的。分开两根引线时，仪表读数为无穷大电阻，应该看到无穷大电阻的显示。在一些数字仪表中，显示屏将显示 OL，另外一些数字仪表显示一个很大的数字，如 9999。即可以通过读零和无穷大测试数字仪表：将其设置为电阻挡，短接引线，观察零欧姆读数，然后分开引线，观察无穷大读数。如图 12-17 所示，数字表测量电阻为无穷大，这表明熔断器是断开的。请注意，显示是 OL。如图 12-18 所示，数字表测量电阻为零，这表明熔断器是好的。请注意，显示是 0.0。

测量连续性意味着在寻找零电阻或无穷大电阻。传导连续性测试是用来测量通过一个开关、或金属丝的电阻是小电阻还是无穷大电阻。如果电阻小，可以说组件具有传导连续性。如果电阻大（无穷大），可以说导线、开关或熔断器是断开的。有些数字仪表有“嘟嘟”声，可以在连续性测试中选择，当电阻小时发出声音信号，代表具有传导连续性。这在测试熔断器、开关或导线时非常有用，它可以使测试很快地进行，因为不是在看一个显示的数字，而是听“嘟嘟”声。

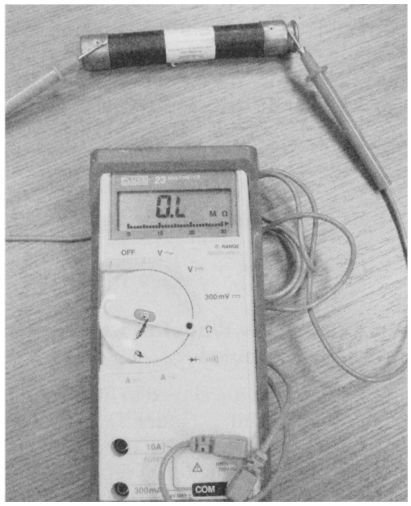


图 12-17　一只测量熔断器断开状态时显示高阻抗（无穷大阻抗）的数字万用表

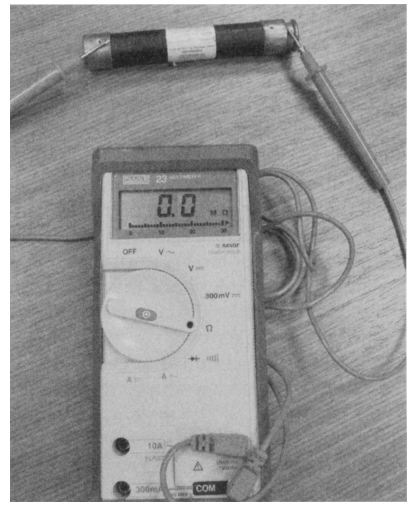


图 12-18　一只测量熔断器完好状态时显示低阻抗的万用表

用电阻表进行的第三种类型的测量用途是测试电动机绕组的直流电阻，或一个可变电阻器的电阻。在这种情况下，实际上是试图确定特定电阻值，所以需要准确地读出仪表测量显示的电阻值。例如，可能会试图比较绕组和变压器，或电动机的绕组，所以需要知道确切的绕组的电阻值。进行此电阻测量时，必须确保电路没有施加电压，所测量的组件的引线是孤立的，这样不会受到来自周围电阻的干扰。将仪表引线接在线圈的两端，然后观察仪表，显示屏上显示的电阻值就是仪表测量的电阻值。

12.3　基于欧姆定律的电压、电流与电阻计算方法

有时需要计算或估算工作电路的电压、电流或电阻。在大多数情况下，对电气问题进行故障诊断时，也需要测量电压、电流和电阻，以确定电路是否运行正常。测量的难题是，不能确定值是过高还是过低，或者是否正好。计算可以得知测量结果是否在电路估计值范围内。

根据欧姆定律，在直流电路中，电压、电流和电阻之间存在着一种关系。欧姆定律简单地表明，直流电路的电压值总是等于电路中电阻乘以电流。如果电路有 2A 电流和 4Ω 电阻，总电压为 8V。

可以改变该公式，以确定电流或电阻值。因为众所周知 $2 \times 4 = 8$，按理说 $8 \div 2 = 4$，$8 \div 4 = 2$。因此，如果测量电路中的电压，发现有 8V，如果测量电路中的电流为 2A，则由 8 除以 2 可以判断电路电阻为 4Ω。还可以通过测量电压和电阻，并计算 $8V \div 4\Omega = 2A$，确定测量电路的电流值。

12.3.1 欧姆定律公式

科学家、工程师和技术人员做计算时，用英文字母表示单位，如伏特、安培和欧姆。由于这些字母被大家所接受，故成为代表各物理量的标准缩写符号而得到广泛采用。

在欧姆定律公式中，字母 E 用来表示电压。E 源自单词“电动势”的第一个字母。字母 R 用来表示电阻。字母 I 用来表示电流（安培）；源自单词“强度”的第一个字母。

欧姆定律表示为公式 $E = IR$。使用欧姆定律时，基本规则是，开始计算时，应该用 E、I 和 R 来代表公式中的未知量，当确定答案后或数值已知或被测量出时，应用 V 代表电压、A 代表电流、Ω 代表电阻的测量单位。

12.3.2 用欧姆定律计算电压

求解电压时，需要知道电流值（安培）和电阻值（欧姆）。如果不知道这两个值，不能计算电压。例如，如果电流是 20A，电阻是 40Ω 时，要计算电压值可以用 40 乘 20 得到答案 800V。解决问题从公式开始，并代入 I 和 R 的值。然后可以继续计算。请注意，当值已知时，需要加上单位 A（代表安培）和 Ω（代表欧姆）。

$$E = IR$$
$$E = 20\text{A} \times 400\Omega$$
$$E = 800\text{V}$$

12.3.3 用欧姆定律计算电流

计算电路中未知电流的公式是

$$I = \frac{E}{R}$$

即计算电流时用电阻除电压。例如，如果已经测得电路中的电压，发现是 50V，已经测得电阻，发现是 10Ω，由 50V 除以 10Ω，得电流等于 5A。

$$I = \frac{E}{R}$$
$$I = \frac{50\text{V}}{10\Omega}$$
$$I = 5\text{A}$$

12.3.4 用欧姆定律计算电阻

计算电路中未知电阻公式是

$$R = \frac{E}{I}$$

即计算电路中的电阻时用电压除以电流。例如，如果测得电压是 60V，电流是 12A，用电压除以电流可得电阻。再次从公式开始，代入数值得到答案。

$$R = \frac{E}{I}$$

$$R = \frac{60\text{V}}{12\text{A}}$$

$$R = 5\Omega$$

12.3.5　用欧姆定律轮记忆欧姆定律公式

有一种能帮助记住所有的欧姆定律公式的辅助学习方法，如图 12-19 所示。可以看到，是一个轮子或圆饼的形状。在圆饼的顶部有字母 E，代表电压；左下角有字母 I，代表电流（安培）；右下角有字母 R，代表电阻（欧姆）。

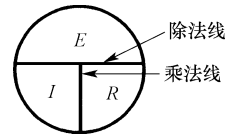


图 12-19　欧姆定律圆饼图，记住所有欧姆定律公式的记忆工具

图 12-20 表示了该公式的使用方法。如果想记住电压公式，把手指放在 E 上：字母 I 和 R 并排显示。分开 I 和 R 的垂直线称为乘法线，因为那是使用 I 和 R 的数学函数。这代表了公式 $E = IR$。

如果想知道电流公式，把手指放在 I 上：剩余的字母是 E 在 R 上方。分开 E 和 R 的水平线称为除法线，因为要确定 I，用 E 除以 R，这代表了公式

$$I = \frac{E}{R}$$

如果想知道电阻公式，把手指放在 R 上：剩余字母是 E 在 I 上方。这代表了公式

$$R = \frac{E}{I}$$

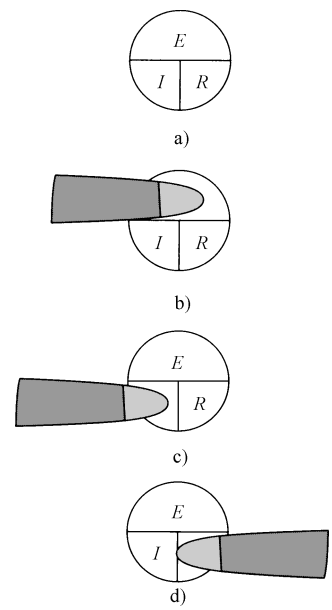


图 12-20　a）欧姆定律圆饼图是记住所有欧姆定律公式的记忆工具　b）如果想用该公式求得电压，把手指放在 E 上　c）如果想用该公式求得电流，把手指放在 I 上　d）如果想用该公式求得电阻，把手指放在 R 上

12.3.6　计算电功率

电功率（P）代表电做功的快慢，电功率的单位是瓦特（W）。功率是由电流乘以电压决定的（$P = IE$）。大多数本质上是电阻的电气负荷，用功率来评估。例如，如果一个电加热元件为 5A 和 110V，其功率为 550W。可以通过使用功率定律计算功率值，$P = IE$：5A × 110V = 550W。

该基本公式可以像欧姆定律公式一样重新安排。可以用电压（110V）除功率（550W）计算出电流，可以用电流（5A）除功率（550W）计算出电压。如图 12-21所示，记住所有功率定律公式的记忆辅助圆饼图。在此图中，原始公式为 $P = IE$，可以通过把手指放在 P 上得到。可以通过把手指放在 I 上找到求解电流的

公式

$$\left(I=\frac{P}{E}\right)$$

也可以通过把手指放在 E 上找到求解电压的公式

$$\left(E=\frac{P}{I}\right)$$

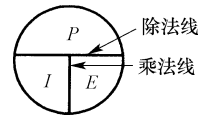


图 12-21　计算功率、电流、电压的公式

12.3.7　展示所有公式

进行故障诊断时，可以很容易得到电压读数。如果能找到数据铭牌，提供加热元件或其他负荷的功率，将能够使用提出的公式之一计算（估算）电流或电阻。通过计算可以得知数值应该是多少，这样可以确定系统是否工作正常。在该领域进行这些测量时，可能很难记住所有的公式，因此开发了一种提供所有公式的图表，如图 12-22 所示。图表是一个轮子的形状，辐条从内环放射。一个十字显示在内轮中间，把内轮分成 4 部分。这些部分由字母 P（功率、瓦特）、I（安培）、E（伏特）和 R（欧姆）代表。

外环的每个部分的公式对应着 P、I、E 或 R。功率公式从 P 标志的内部扇出。所有的电流公式从 I 标志的内部扇出。所有的电压公式从 E 标志的内部扇出，所有的电阻公式从 R 标志的内部扇出。

如果需要计算电路中的功率或任何个别元件所用的功率，可以使用显示在轮子上从由 P 确定的部分扇出的三个公式中的任意一个。因此，可以使用 $P=EI$，$P=I^2R$，或 $P=E^2/R$。选择的公式将取决于两个给定值。

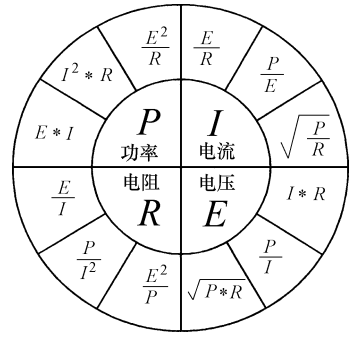


图 12-22　计算功率、电流、电压和电阻的所有公式

12.3.8　在数字中使用前缀和指数

有时看到的数字需要许多空间打印，如 5000000 或 0.0000003。需要在表盘或计算中写一个长数字时，该数字需要以一种不会占用太多空间的形式书写。因此，几种标准已经在数学和电力领域得到了应用。表 12-1 表示了几种使用较少空间的数字书写方式。例如，如果想缩短数字表示 5000000Ω，可以使用前缀“兆（M）”，表示该值为 5 兆欧，或使用符号，5MΩ。如果想在计算器中使用该数字，可以使用指数形式，即 $5^{e6}\Omega$。该指数可以口头表示为“5 乘以 10 的 6 次幂”。

表 12-1　在电量和电气设备中常用的前缀、符号及指数对应关系

前缀	符号	数量级	指数	前缀	符号	数量级	指数
兆	M	1000000	10^6	毫	m	0.001	10^{-3}
千	k	1000	10^3	微	μ	0.000001	10^{-6}

如果需要缩短数值 7000Ω，可以使用前缀“千（k）”，表示该值为 7 千欧，或

使用符号，7kΩ。如果想在计算器中使用该指数形式，可以使用 $7^{e3}\Omega$。口头表示该指数时，读作“7 乘以 10 的三次幂”。

如果想要缩短数值 0.005A，可以使用前缀“毫（m）”，表示该值为 5 毫安或 5mA。计算中使用指数，可以用 5^{e-3}A。口头表示该指数读作：“5 乘以 10 的负 3 次幂”。如果想要缩短数值 0.000002A，可以使用前缀“微（μ）”，表示该值为 2 微安或 2μA，这里 μ 是希腊字母 mu。要在计算器中使用该指数，可以使用 2^{e-6}A。口头表示该指数，读作“2 乘以 10 的负 6 次幂”。

12.4　电路基础

一个基本电路包括一个电源、导线（电线）、一个或多个闭合时允许电流流过或断开时切断电流的开关（控制）以及负荷如电动机。基本图可以用两种方式画出：图 12-23 以接线图形式表示了这些元件，图 12-24 以梯形图的形式表示了这些元件。接线图用来显示电路中元件的位置，而原理（梯形）图用来显示动作顺序。图 12-24 称为梯形图是由于加入额外负荷时，其显示在额外的“梯级”上，使得该图的整体外观像一个木梯。图中的第一行的负荷将在第二行或第三行（梯级）的负荷之前通电。设备制造商提供原理（梯形）图或接线图或两者来帮助用户对系统进行安装和故障排除。

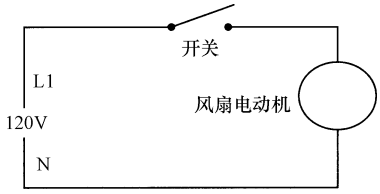


图 12-23　接线图所示的一个电源、开关以及风扇电动机。接线图的功能是显示电路中元件的位置

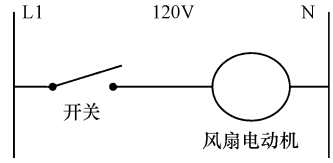


图 12-24　原理（梯形）图所示的一个电源、开关以及风扇电动机。注意，该梯形图只有一个梯级

这里我们介绍一些基本术语来帮助大家了解电的工作原理。开关有两个基本状态：断开或闭合。当电路中的开关断开时，称为断开开关。电子不能流过断开的触点，因此电路中所有的电流中断，负荷关停。例如，如果开关正在控制一个电动机，当触点断开时，电流不能流过开关，电动机关停。当开关闭合时，称为闭合开关，电流允许流过，电动机将会运行。

用由电阻组成的简单电路来解释串联电路中电压、电流和电阻之间的关系。电阻是用于控制系统的现代电子电路板中的常见元件。系统中的电动机和其他负荷在某些部分表现为电阻，所以了解串联电路中多个电阻之间的关系非常重要。理解串联电路和并联电路中的电阻对于理解通常用于控制系统固态控制的固态元件至关重要。

作为一名技术人员，必须了解串联电路中开关和电力负荷的影响，掌握串联开关和负荷之间的关系。并联开关和负荷的影响将随后介绍。

串、并联电路中电压、电流和电阻之间的关系将会介绍。电阻值已知时，更容易理解这些关系。电阻元件用来为这些简单串联电路提供电阻。每个电阻都有颜色带组成的颜色代码，标在电阻器上以分辨其电阻值。欧姆定律也将帮助理解在所有类型的串联电路中电压和电流如何反应。本章讨论的基本规则将帮助对通常用于控制系统的复杂电路进行故障诊断。

12.5 串联电路

所有的电路至少有一个电源、一个负荷以及为电流提供路径的导线。由于增加了控制开关，电路变得会更加复杂。这些开关可以提供各种功能，取决于其连接在电路中的方式。以简单电路为例，如包括电源、控制开关以及作为负荷的电动机。该电路被称为串联电路，因为电流只有一条路径流过负荷并返回电源。

在电路中添加额外的开关来控制负荷时，可以将开关连接起来，使得所有电流仍然只有一条路径流过线路。图 12-25 也是一个串联电路，因为电流只有一条路径，从 L1 通过三个开关到达负荷并流回 N。如果三个开关中的任何一个断开，电流中断，电动机将关停。当所有的开关闭合时，电动机将会运行。

因为所有开关是串联的，每个开关断开都会造成电流停止流入电动机。如果需要在该电路中添加额外的操作或安全开关，将与原始开关串联。开关串联时，其中任何一个都可以断开并中断整个电路中的电流。

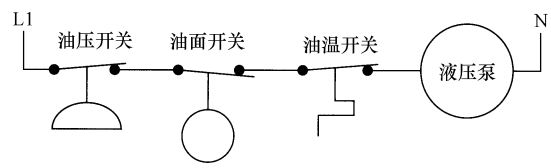


图 12-25 串联电路，包括控制液压泵的油压开关、油位开关以及油温开关

12.5.1 串联开关

开关串联连接来控制电动机和泵。串联电路的基本规则是，任何时候一个串联开关断开，电流中断，所有需要电流的负荷将会断电。只要有一个开关、熔断器或导线断开，串联电路中的所有电流中断。

12.5.2 其他串联元件

熔断器是另一种与导线、电动机以及控制开关串联的电气元件。熔断器是为保护电路不过载而设计的。如果由于某种原因，电流超过正常值，熔断器将会过热，熔丝会熔化，造成熔断。由于熔断器与系统中的所有负荷和导线串联，将导致系统的电源关闭。熔断器串联接线使得其能够断开并保护整个电路，因为串联电路中任何地方断开，将会导致电路所有元件中的电流中断。

隔离开关是一个与熔断器组合的开关。通过开关与熔断器串联，这样当需要更

换系统电气元件时，供给元件的所有电力可以关闭。以这种方式，隔离开关是一个串联在电气系统每个部分的安全装置，因为是串联的，可以通过断开而中断系统每个部分的电流和电动势。

12.5.3　加入串联负荷

在电力系统，如风力机中，电动机这类负荷不能与其他负荷串联；相反，是彼此并联的，这样都得到相同的电压。但有些加热元件如电热器通过串联连接。此外，串联电阻还可用于为风力机电子控制中的电子电路板和元件分压。

负荷一般不串联，因为其会分压。例如，如果将两个灯丝电阻值相同的灯泡串联连接，并给电路供电 120V，每个灯泡将获得 60V。每个灯泡只会发出接受到全部 120V 时一半的亮度。

在某些情况下，负荷串联连接，如电加热元件。如果每个加热元件的电阻值相等，电源电压将在其中平分。例如，如果电源电压为 240V，每个加热元件将获得 120V。这意味着每个加热元件额定电压必须为 120V。该种类型的电路允许在较大电压源中使用较小的加热元件。

串联负荷的另一个问题是，如果负荷重的一个有缺陷并发展为开路，电路中所有负荷的电流将被中断。这种类型电路的一个例子是用来装饰圣诞树的灯串。所有的灯串联，如果其中一个烧坏，整个灯串都会熄灭。将 50 个灯串联的好处是，电路加入 120V 电压源时，每一个灯泡将获得约 2.4V 电压。

12.5.4　用欧姆定律计算串联电路的电阻、电压和电流

在电子电路中，一些负荷是电阻。这些类型的电路广泛用于风力机设备的电子电路中。用以下电路来解释电阻的变化如何影响电压和电流。图 12-26 表示了三个电阻串联在一个电压源（电池）的例子。由于电阻串联，只有一个电流通路。这些电阻编号为 R_1、R_2 和 R_3，电源电压定为 E_T。计算串联电路总电阻的公式是 $R_T = R_1 + R_2 + R_3$。如果在电路中使用超过三个电阻，附加电阻加入先前三个已获得的总电阻。箭头表明常规的电流流动。（电子流将显示电子从电池负极向正极流动。本文将在解释和图表中使用常规的电流流动。）如果想要使用电子流理论，电流流动方向与箭头相反。

图 12-26 中的串联电路有三个电阻：$R_1 = 30\Omega$，$R_2 = 20\Omega$，$R_3 = 50\Omega$。该电路的总电阻由公式计算得

$$R_T = R_1 + R_2 + R_3$$

$$R_T = 30\Omega + 20\Omega + 50\Omega$$

$$R_T = 100\Omega$$

12.5.5　求解串联电路中的电流

总电流可以由欧姆定律公式计算：$I = \dfrac{E_T}{R_T}$，$I = \dfrac{300\text{V}}{100\Omega}$ 或 $I = 3\text{A}$。任何串联电路的总电流在电

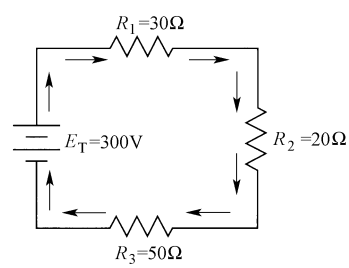


图　12-26

路中各处都一样，因为只有一个电流路径。一旦得到串联电路的总电阻，可以用总电阻除总电压求得总电流，并且还确定了流过每个电阻的电流。由于串联电路中电流处处相等，如果电阻 R_1 中电流已知，可以确定其为 I_T 或 I_1。

12.5.6 计算每个电阻的电压降

每个电阻两端的电压降可以由欧姆定律公式计算（$E = IR$）。串联电路中电流处处相等，所以如果 $I_T = 3\text{A}$，I_1、I_2 和 I_3 也等于 3A。在这种情况下，电阻 R_1 两端的电压降由公式计算得

$$E_1 = I_1 R_1 \quad E_1 = 3\text{A} \times 30\Omega \quad E_1 = 90\text{V}$$

如果把电压表探针放在电阻 R_1 的两端，将测得 90V。这是电流流过电阻时产生的实际电压降。电阻 R_2 两端的电压降由公式计算得

$$E_2 = I_2 R_2 \quad E_2 = 3\text{A} \times 20\Omega \quad E_2 = 60\text{V}$$

电阻 R_3 两端的电压降由公式计算得

$$E_3 = I_3 R_3 \quad E_3 = 3\text{A} \times 50\Omega \quad E_3 = 150\text{V}$$

由这些计算可以看到，R_1 的电压降是 90V，R_2 的电压降是 60V，R_3 的电压降是 150V。如果将所有电压降加起来，会发现其等于电源电压。这意味着 $E_1 + E_2 + E_3 = E_T$（$90\text{V} + 60\text{V} + 150\text{V} = 300\text{V}$）。

例 12-1 电路有三个串联电阻，电源电压是 450V。电阻 $R_1 = 40\Omega$，$R_2 = 30\Omega$，$R_3 = 20\Omega$。计算电路总电阻。计算出电路总电阻后，用总电阻除以总电压来计算总电流。当确定了电路总电流，计算每个电阻的电压降。

解：R_T 由公式 $R_T = R_1 + R_2 + R_3$ 计算得

$$R_T = 40\Omega + 30\Omega + 20\Omega \quad R_T = 90\Omega$$

I_T 由公式 $I_T = \dfrac{E_T}{R_T}$ 计算得

$$I_T = \frac{450\text{V}}{90\Omega} \quad I_T = 5\text{A}$$

由于电路中电流处处相等，

$$I_T = 5\text{A} \quad I_1 = 5\text{A} \quad I_2 = 5\text{A} \quad I_3 = 5\text{A}$$

电流流过每一个电阻产生的电压降由下列公式计算得

$$E_1 = R_1 I_1 \quad E_1 = 40\Omega \times 5\text{A} \quad E_1 = 200\text{V}$$
$$E_2 = R_2 I_2 \quad E_2 = 30\Omega \times 5\text{A} \quad E_2 = 150\text{V}$$
$$E_3 = R_3 I_3 \quad E_3 = 20\Omega \times 5\text{A} \quad E_3 = 100\text{V}$$

可以通过将所有电压降相加等于总的电源电压来检查答案是否正确：

$$E_T = E_1 + E_2 + E_3 \quad E_T = 200\text{V} + 150\text{V} + 100\text{V} \quad E_T = 450\text{V}$$

12.5.7 计算每个电阻的功率损耗

每个电阻消耗的功率或整个电路消耗的功率可以由三个功率公式中任何一个计

算：$P=EI$，$P=I^2R$ 以及 $P=E^2/R$。之前计算了电路中每个电阻的电压、电流和电阻。可以用三个公式中的任何一个来计算任何电阻的功率。例如，用全部三个公式来计算均给出相同的结果。使用 R_1 的数值：$E_{R1}=200\text{V}$，$I_{R1}=5\text{A}$，$R_1=40\Omega$。

$$P=EI \qquad P=200\text{V}\times5\text{A} \qquad P=1000\text{W}$$

$$P=I^2R \qquad P=(5\text{A})^2\times40\Omega \qquad P=1000\text{W}$$

$$P=E^2/R \quad P=(200\text{V})^2/40\Omega \quad P=1000\text{W}$$

由于三个公式相等，可以选择三个中的任意一个。决定用哪个公式的主要因素是已经给定的或测量能确定的量。

12.5.8　计算电气加热元件的功率损耗

功率公式也可用于计算电路中使用的任何其他类型电阻的功率损耗。电气加热系统使用的电气加热元件是大电阻负荷。如果知道元件的电阻值以及电路的供电电压值，可以计算元件通过的电流值以及其消耗的功率值。例如，如果加热元件电阻是 10Ω，接到 240V 电压上，会产生 24A 电流，并消耗 5760W 功率。

例 12-2　电气加热系统的加热元件电阻是 2.5Ω。如果加热系统接入 240V 交流电，计算该加热元件的电流和功率损耗。

解：电流值计算得 240V/2.5Ω = 96A。功率值可以由公式 $P=I^2R$ 或 $P=EI$ 计算，使用 $P=I^2R$，有 $(96\text{A})^2\times2.5\Omega=23040\text{W}$。

使用 $P=IE$，得到 $96\text{A}\times240\text{V}=23040\text{W}$。

（注意：答案还可表示为 23.040kW。）

12.6　并联电路

并联电路也常用于电气系统中。串联电路和并联电路之间的区别是，并联电路中的所有负荷供电电压相同，而串联电路中每个负荷有不同的电压值，这取决于其电阻值。电气系统中的负荷元件，如水泵电动机，必须提供相同的电压，因此在同一电路中时必须并联。电阻并联接入电路的每个回路称为支路。并联电路可以有任意数量的支路。并联电路允许电流通过不止一个路径回到电源，这些路径可由接线图中的箭头确定。

并联电路中的电流可叠加，计算总电流的公式是 $I_\text{T}=I_1+I_2+I_3+\ldots$（… 代表额外的电流可以加到总数中）。随着更多负荷加入电路，并联电路电流会更大。并联电路还提供了一种断开任意负荷的同时保持电源仍对其余负荷供电的方法，这是通过在各支路每个电阻前加入一个开关来实现的。

当在并联电路的干路中加入开关，成为一个串并联电路，电路中某些部分是串联的，其他部分是并联的。例如，电路的熔断器和隔离开关必须能够中断电路中所

有负荷的供电，所以熔断器和隔离开关必须与电源串联。分析串并联电路时，要对串联电路部分使用串联公式，对并联电路部分使用并联公式。也可以结合电路各部分，使之简化为串联或并联。

12.6.1　计算并联电路的电压、电流和电阻

并联电路的电压、电流和电阻可以像串联电路一样用欧姆定律计算。图 12-27 表示了计算电路中各部分电压、电流和电阻的例子。从图中可以看出，电源电压是 300V。由于电源电压是 300V，可以确定每个支路每个电阻的电压也是 300V，因为并联电路每个支路的电压等于电源电压。

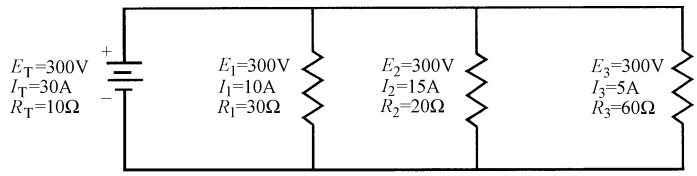


图 12-27　标注了负荷电压、电流和电阻的并联电路

流过每个电阻的电流可以由欧姆定律电流公式计算：$I = E/R$。每条支路的电流由该公式计算，并列标在图中每个电阻旁边。

$$I_1 = E/R_1 \qquad I_1 = 300\text{V}/30\Omega \qquad I_1 = 10\text{A}$$
$$I_2 = E/R_2 \qquad I_2 = 300\text{V}/20\Omega \qquad I_2 = 15\text{A}$$
$$I_3 = E/R_3 \qquad I_3 = 300\text{V}/60\Omega \qquad I_3 = 5\text{A}$$
$$I_T = E_T/R_T \qquad I_T = 300\text{V}/10\Omega \qquad I_T = 30\text{A}$$
$$I_T = I_1 + I_2 + I_3 \quad I_T = 10\text{A} + 15\text{A} + 5\text{A} \quad I_T = 30\text{A}$$

如果电压和电流给定，需要计算电阻，可以使用欧姆定律电阻公式：$R = E/I$。

$$R_1 = E/I_1 \qquad R_1 = 300\text{V}/10\text{A} \qquad R_1 = 30\Omega$$
$$R_2 = E/I_2 \qquad R_2 = 300\text{V}/15\text{A} \qquad R_2 = 20\Omega$$
$$R_3 = E/I_3 \qquad R_3 = 300\text{V}/5\text{A} \qquad R_3 = 60\Omega$$
$$R_T = E_T/I_T \qquad R_T = 300\text{V}/30\text{A} \qquad R_T = 10\Omega$$

如果电路中总电阻和总电流已知，可以计算电路的电压。如果知道任意支路电流和电阻，也可以用欧姆定律公式计算电压：$E = IR$。计算电压的优点是，一旦确定任意支路的电压，其他支路电压和电源电压与之相同。同样，一旦计算得到电源电压，也不再需要计算其他支路的电压，因为它们是相同的。

$$E_T = I_T R_T \qquad E_T = 30\text{A} \times 10\Omega \qquad E_T = 300\text{V}$$
$$E_1 = I_1 R_1 \qquad E_1 = 10\text{A} \times 30\Omega \qquad E_1 = 300\text{V}$$
$$E_2 = I_2 R_2 \qquad E_2 = 15\text{A} \times 20\Omega \qquad E_2 = 300\text{V}$$
$$E_3 = I_3 R_3 \qquad E_3 = 5\text{A} \times 60\Omega \qquad E_3 = 300\text{V}$$

例 12-3　用图 12-28 中的电路计算各支路电流、总电流和总电阻。

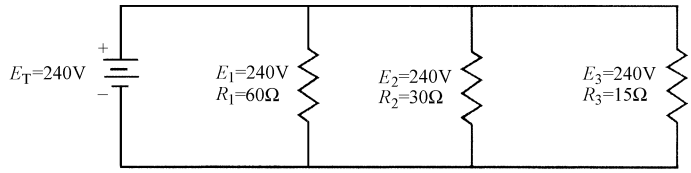


图 12-28　例 12-3 中给出电路电压和电阻的并联电路

解：用下面的公式计算各支路电流：

$$I_1 = E/R_1 \qquad I_1 = 240\text{V}/60\Omega \qquad I_1 = 4\text{A}$$

$$I_2 = E/R_2 \qquad I_2 = 240\text{V}/30\Omega \qquad I_2 = 8\text{A}$$

$$I_3 = E/R_3 \qquad I_3 = 240\text{V}/15\Omega \qquad I_3 = 16\text{A}$$

用下面的公式计算总电流 I_T：

$$I_T = I_1 + I_2 + I_3 \quad I_T = 4\text{A} + 8\text{A} + 16\text{A} \quad I_T = 28\text{A}$$

用下面的公式计算总电阻 R_T：

$$R_T = E_T/I_T \qquad R_T = 240\text{V}/28\text{A} \qquad R_T = 8.57\Omega$$

有时只提供支路电阻和电源电压时，需要计算并联电路总电阻。可以计算各支路电流，然后用公式计算总电流 $I_T = I_1 + I_2 + I_3$。确定了总电流，可以用公式 $R_T = E_T/I_T$ 计算总电阻。

可以使用另一种称为“乘积在总和之上”的方法计算并联电路总电阻。这种方法之所以称为“乘积在总和之上”是因为将两个电阻相乘得到乘积，将两个电阻相加得到总和。计算的第三个步骤是用总和除乘积（乘积在总和之上）。公式如下所写：

$$R_T = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

用该公式只能一次计算两个电阻的总电阻。如果电路有三个电阻，需要计算出前两个支路的总电阻，然后用其总电阻和第三个电阻再次通过公式计算最终的总电阻。下面使用此方法来计算并联以下电阻的总电阻：$R_1 = 30\Omega$，$R_2 = 20\Omega$，$R_3 = 60\Omega$。

由于用这种方法只能一次用两个电阻，第一步要找到电阻 R_1 和 R_2。并联电阻 R_1 和 R_2 的电阻值称为等效电阻。由于这是第一个等效电阻，称其为 R_{eq1}。第二步计算 R_{eq1} 和 R_3 的并联电阻。由于有三个电阻，故电阻 R_{eq1} 和 R_3 并联后是电路的总电阻（R_T）。

$$R_{eq1} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \quad R_{eq1} = \frac{30\Omega \times 20\Omega}{30\Omega + 20\Omega} \quad R_{eq1} = 12\Omega$$

$$R_T = \frac{R_{eq1} R_3}{R_{eq1} + R_3} \quad R_T = \frac{12\Omega \times 60\Omega}{12\Omega + 60\Omega} \quad R_T = 10\Omega$$

从这些计算可以看到，并联电路总电阻是 10Ω。在所有并联电路中，总电阻总

是小于最小的支路电阻。在这个电路中可以看到，最小支路电阻是20Ω，总电阻是10Ω。

也可以用下式计算总电阻

$$R_T = \frac{1}{\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}+\frac{1}{R_3}} \text{或} \frac{1}{R_T} = \frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}+\frac{1}{R_3}$$

该公式方便在具备计算器的情况下采用。如果没有计算器，建议使用之前的方法。

例 12-4　计算图 12-29 并联电路中通过每个电阻的电流、总电流和电路总电阻。电源电压是100V。

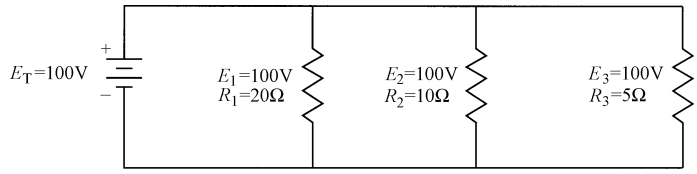


图 12-29　例 12-4 的并联电路

解：

$$I_1 = E/R_1 \qquad I_1 = 100\text{V}/20\Omega \qquad I_1 = 5\text{A}$$
$$I_2 = E/R_2 \qquad I_2 = 100\text{V}/10\Omega \qquad I_2 = 10\text{A}$$
$$I_3 = E/R_3 \qquad I_3 = 100\text{V}/5\Omega \qquad I_3 = 20\text{A}$$
$$I_T = I_1 + I_2 + I_3 \quad I_T = 5\text{A} + 10\text{A} + 20\text{A} \quad I_T = 35\text{A}$$
$$R_T = \frac{1}{\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}+\frac{1}{R_3}} \qquad R_T = \frac{1}{\frac{1}{20\Omega}+\frac{1}{10\Omega}+\frac{1}{5\Omega}}$$
$$R_T = 2.86\Omega$$

12.6.2　计算并联电路的功率

计算并联电路功率的公式与串联电路的相同：$P_T = P_1 + P_2 + P_3$。每个电阻的功率公式从原始功率定律公式 $P = IE$ 中得到。必须首先计算每个支路电阻消耗的功率，然后将其相加得到总功率。例如，在之前图 12-27 所示的并联电路中，R_1 的电压是300V，电流是10A，R_2 的电压是300V，电流是15A，R_3 的电压是300V，电流是5A。下面的计算用来确定每个电阻消耗的功率以及整个电路消耗的总功率。

$$P_1 = I_1E_1 \quad P_1 = 10\text{A} \times 300\text{V} \quad P_1 = 3000\text{W}$$
$$P_2 = I_2E_2 \quad P_2 = 15\text{A} \times 300\text{V} \quad P_2 = 4500\text{W}$$
$$P_3 = I_3E_3 \quad P_3 = 5\text{A} \times 300\text{V} \quad P_3 = 1500\text{W}$$
$$P_T = P_1 + P_2 + P_3 \quad P_T = 3000\text{W} + 4500\text{W} + 1500\text{W}$$

$$P_T = 9000\text{W}$$

也可以用下列公式计算该电路消耗的总功率。

$$P_T = I_T E_T \quad P_T = 30\text{A} \times 300\text{V} \quad P_T = 9000\text{W}$$

12.7　串-并联电路

作为技术人员，经常会接触到各类电气系统的电路。这些系统会有很多串-并联连接的开关和负荷。一个典型的串-并联电路如图 12-30 所示，液压泵电动机和润滑油泵电动机并联连接。这两个电动机并联，因此每一个会承受相同的电压值。当负荷如电动机在电路中并联连接时，构成了一个电力电路。

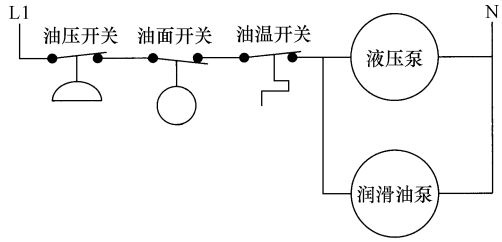


图 12-30　有一个液压泵和一个润滑油泵的串-并联电路例子。开关串联，两个电动机并联

这些负荷也与三个控制开关串联：油压开关、油位开关和作为油温开关的恒温器。如果这三个开关中的任何一个打开，所有负荷的电流将中断，因此开关属于串联连接。由于该电路有一些串联开关和两个并联负荷，故称为串-并联电路。

串联的电路部分将遵循串联电路的所有规则，并联的电路部分将遵循并联电路的所有规则。该串-并联电路将为负荷合理供电并为其运行提供良好的控制。这种类型的串-并联电路常用于各类电气设备领域。

12.7.1　风力机中的串-并联电路

串-并联电路用于各种风力机设备中。可以使用已经了解的有关串并联电路的基本知识，根据所承受的电压和电流来对导线和开关的型号进行简单估算。图 12-31 表示了电气系统串-并联电路示例。从该图中可以看出，该电路有一些与电动机串联的开关，电动机之间并联。例如，如果一个隔离开关连在电路顶部的 L1 处，其将与整个电路串联。如果断开隔离开关，整个电路将断开。

油压开关和油温开关与液压泵电动机 1 和液压泵电动机 2 串联。润滑驱动电动机电流是 5A，液压泵电动机 1 电流是 20 A，液压泵电动机 2 电流是 7A；因此，油位开关必须至少估计为 32A，因为所有电流都将流过它。如果要选择一个熔断器放在 L1 处来保护整个电路，需要选择一个大于 32A 的熔断器。

油压开关和油温开关与液压泵电动机 1 和液压泵电动机 2 串联，所以它们必须能承载两个电动机所用的 27A。任何时候这些开关中的任意一个断开，流向这些电动机的电流将会中断。所有三台电动机并联，因此都将得到相同的电压，但是每一

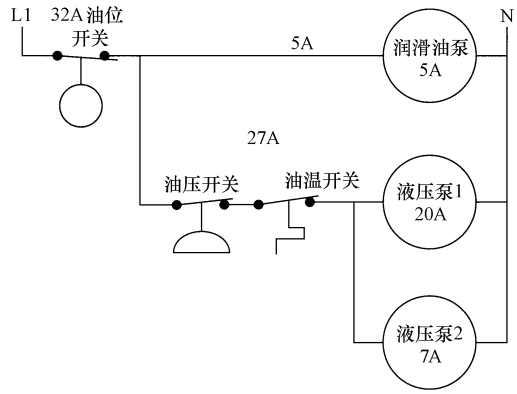


图 12-31 一个串-并联电路的例子。油位开关将有 32A 流过（润滑油泵，5A；液压泵电动机 1，20A；液压泵电动机 2，7A）。油压开关和油温开关只有 27A 流过（液压泵电动机 1，20A；液压泵电动机 2，7A）

个电流值将会不同，除非其负荷特性是相同的。若需要得到供给三个电动机的总电流值可以通过公式计算：$I_T = I_1 + I_2 + I_3$。

12.8 电容及容性电抗

电容器是一种电力器件，有两个极，具有储存电荷的能力。电容器由两个导电板组成，导电板由被称为电介质的绝缘体分隔。如果电容是电解电容，一个极带负电，另一个极带正电。而在所有其他电容器中，两个极都没有极性。负极由一个减号表示，该极端部看起来像一个半圆。正极由一个加号表示。

电容的工作特性可以通过施加直流电压使其充电然后放电来很好地描述。起初，由于电容器不带电，电路闭合时，电子流开始从电池的负极流向电容的负极。电流没有流过电容，因为两个极板由电介质分隔开，电介质是良好的绝缘体。电子继续流动，直到电容器极板电压（充电）等于电池电压。在该点上，电容和电池之间没有电势差，因此电流停止流动。由于电容器正、负极板之间的电介质是一种良好的绝缘体，理论上，当开关断开导致电容器与电池断开时，电容器保持原有电荷数量。

由于电容正、负极板之间有很大的电势差，电容器放电时，电子就会从负极板流向正极板，直到每个极板充电相等。在该点上，如果开关再次移动到闭合位置，电容将再次充电。当电容器存放在直流电压电路中，电容将会充电并保持带电，直到改变电路让电容放电。如果电容放在交流电压电路中，会按照电路的电压和频率充、放电。

12.8.1 交流电路中的电阻和电容

在以前的章节中了解到，当电容或电感用在交流电路中时，将产生类似电阻的阻力。电容引起的阻力称为容抗，电感引起的阻力称为感抗。在交流电路中，容

抗、感抗和电阻引起的阻力统称为阻抗。容抗、感抗和电阻之间的主要区别是电压波形和电流波形之间发生的相移不同。图 12-32a 中交流电路有一个电阻和一个电容。图 12-32b表示了该电路的电压和电流波形，图 12-32c 表示了用来计算该图相移量的相量图。相量图是从用来确定相位角的三角函数计算中得出的图。

当电压遇到电路中的电容时，需要时间来对电容器充电，然后使其放电。这将引起电抗，形成对电压波形的阻力。电容器不会影响电流波形。

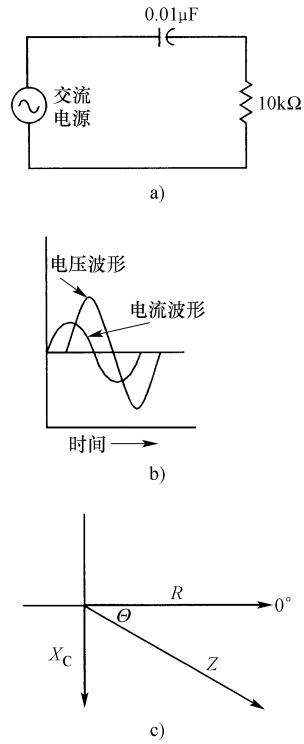


图 12-32　a）交流电路中的电容和电阻 b）交流电路的电压波形和电流波形（请注意，电流波形超前电压波形）c）显示电阻两端电压与电容两端电压之间关系的相量图

12.8.2　计算容抗

表征电容器引起的总阻力的物理量称为容抗，由符号 X_C 表示。尽管可能不需要计算容抗，但应该了解电容容量和频率变化对容抗的影响。容抗可以通过下列公式计算：

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC}$$

式中，$\pi = 3.14$；f 为频率；C 为用法拉（F）表示的电容。

从该公式可以看出，要得到容抗值必须知道电容值和交流电压的频率。例如，如果一个 40μF 的电容用在 60 Hz 的电路中，阻力值（容抗）为 66.35Ω。请注意，由于容抗是阻力，其单位是欧姆。计算如下：

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{2 \times 3.14 \times 60 \times 0.000040}\Omega = 66.35\Omega$$

例 12-5　计算有一个 90μF 电容在 60Hz 交流电路中形成的容抗。

解：

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{2 \times 3.14 \times 60 \times 0.000090}\Omega = 29.49\Omega$$

12.8.3　计算电容和电阻电路的总阻抗

可以计算交流电路中电容和电阻引起的总阻值（阻抗）。例如，如果一个电路有 70Ω 电阻和 40Ω 容抗，总阻抗必须用阻抗公式计算，因为电路中的电压和电流的相位不同。该电路的阻抗计算公式是

$$Z = \sqrt{R^2 + X_C^2}$$

$$Z = \sqrt{70^2 + 40^2}\Omega \quad Z = 80.62\Omega$$

12.9　交流电路中的电阻与电感

当电感（线圈）用在交流电路中时，产生类似于电阻的阻力，电感引起的阻力称为感抗。容抗、感抗和电阻之间的主要区别是电压和电流波形之间发生的相移不同。图 12-33a 中交流电路有一个电阻和一个电感。图 12-33b 表示了该电路的电压和电流波形，图12-33c 表示了用来计算该图相移量的相量图。

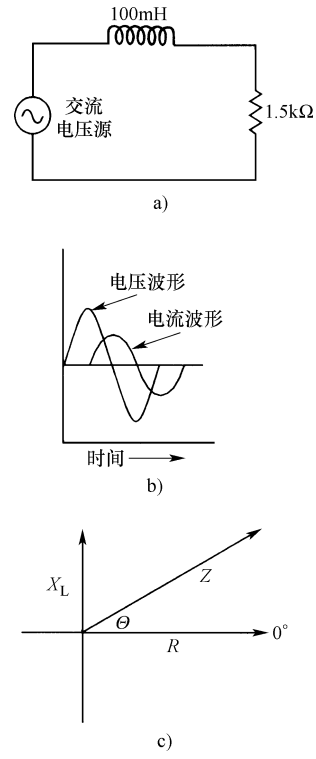


图 12-33　a）交流电路中的电感和电阻　b）电感和电阻性电路中的电压及电流波形　c）体现电感电压超前于电阻电压的相量图

电流在电路中流过电感时，需要时间来给电感充电，然后使其放电。这将产生电抗，成为对电流波形的阻力。电感不影响电压波形。在图 12-33b 中可以看到，电流波形滞后，或迟于电压波形。

12.9.1　计算感抗

电感引起的总阻力称为感抗，由符号 X_L 表示。正如容抗的例子，感抗也可以计算，重要的是要了解电感和频率变化对感抗的影响。感抗可以由以下公式计算：

$$X_L = 2\pi fL$$

式中，$\pi = 3.14$；f 为频率；L 为用亨利（H）表示的电感。

从该公式可以看出，必须知道电感值和交流电压的频率。例如，如果一个 80H 的电感器在 60Hz 电路中使用，阻抗值（感抗）为 30144Ω（30.144 kΩ）。请注意，由于感抗具备电阻特性，单位是欧姆。计算如下：

$$X_L = 2\pi fL = 2 \times 3.14 \times 60\text{Hz} \times 80\text{H} = 30144\Omega$$

例 12-6　计算有一个 20H 电感的 60Hz 交流电路的感抗。

解：

$$X_L = 2\pi fL = 2 \times 3.14 \times 60 \times 20\Omega = 7536\Omega$$

12.10　阻抗及感性电路的阻抗计算

可以计算交流电路中电感和电阻引起的总阻值（阻抗）。例如，如果一个电路有 70Ω 电阻和 50Ω 感抗，总阻抗必须用相量图计算，因为电路中的电压和电流相位不同。该电路的阻抗计算公式是

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2}$$

$$Z = \sqrt{70^2 + 50^2}\,\Omega$$

$$Z = 86.02\,\Omega$$

12.11　交流电路中的有功功率与视在功率

在直流电路中，可以简单地用电压乘以电流来确定电路的总功率。在交流电路中，必须考虑每一个阻抗引起的电流，分别计算由电阻和电容或电阻和电感产生的功率。这样做的原因是，当电流由电阻引起时，称为有功功率（*TP*），当电流由容抗和感抗引起时，称为无功功率（*RP*）[㊀]。视在功率不考虑电容和电感引起的相移。当电流通过一个电阻时产生的功率称为有功功率，因为电阻不会使电压波形和电流波形之间产生相移。

要记住的主要一点是，交流电路中的有功功率可以用来获得潜在的热能。因此，如果有 1000W 有功功率，可以确定能够从该电路得到 1000W 热功率。

12.12　功率因数计算

交流电路中的有功功率和视在功率（*AP*）的比值称为功率因数（*PF*）。功率因数的公式是

$$PF = \frac{TP}{AP}$$

例 12-7　计算电路的功率因数，电路有 600V · A 视在功率和 500W 有功功率。请注意，当在感性电路中用电压乘以电流时，得到的是视在功率，单位是 V · A，代表伏安。

解：

$$PF = \frac{TP}{AP} = \frac{500\,\mathrm{W}}{600\,\mathrm{V \cdot A}} = 0.83 \text{或} 83\%\,,$$

㊀ 原文误为“视在功率”，应该为“无功功率（*RP*）”。——译者注

电路中的有功功率总是小于视在功率，因此功率因数始终小于1。在纯电阻电路中，有功功率和视在功率是相同的，所以功率因数为1。当功率因数过低时，电力公司将在电费账单中大幅度地增加罚款。当工厂每个月缴纳超过20000美元电费时，问题就特别突出了。在这些类型的应用中，可以通过在感性电路中（有大电动机或多台电动机）增加额外电容或在容性电路中增加额外电感来校正功率因数。商业功率因数校正系统可用于这些场合中。

12.13 基于电抗与电容的功率因数调节

对于电感引起的功率因数降低，可以添加电容器使功率因数回到1，这也称为单位功率因数。如果功率因数由过多电容引起，可以添加电感线圈来纠正功率因数。风力机连接到电网，进行并网前必须纠正功率因数。大多数风力机产生的交流电压的功率因数需要通过增加电容纠正，通常使用电容器组。

12.14 无功功率

无功功率的单位是var，代表伏安容量。无功功率非常大时，使用单位kvar。无论无功功率是由电容引起的还是由电感引起的，它的单位是相同的。

12.15 三相变压器

图12-34表示了在工程中经常用到的三相变压器。变压器安装在风力机设备附近，也可能是在一个配电室（一种里面安装变压器的特殊房间）中。有时，变压器安装在商业区外的电线杆塔上。图12-35所示的是一个打开盖板的三相变压器，因此可以看到三个分开的变压器绕组。三相变压器的运行原理类似于单相变压器，交流电压施加在变压器的一次绕组，在二次绕组中感应出电压。在三相变压器的例子中，施加在一次绕组的三相电压的120°相移也将在二次绕组中得到保持。

图12-34 盖好盖板的典型三相变压器
（图片来源：Pearson教育/PH大学）

当应用于一个商业系统时，可能需要将变压器的二次侧连接到隔离柜，或将变压器二次侧连接到负荷中心。可能还需要对变压器端子进行电压试验。可以使用变压器侧面提供的接线图，以确定要用的正

确的端子。在大多数情况下，用户不需要对变压器的一次侧进行电气连接，因为一次电压可能会比较高（12470V 交流电压或更高）。电力公司的电气技术人员或高电压服务公司的技术人员将会对变压器一次侧进行电气连接。风力机设备需要与各种开关设备进行连接。

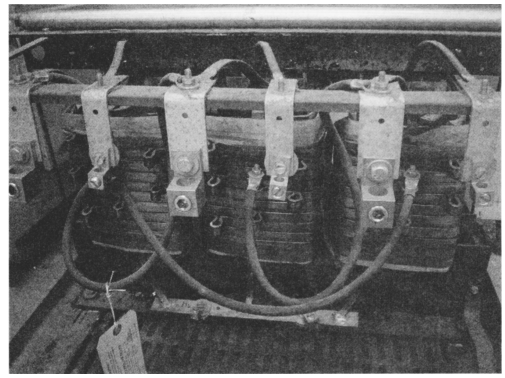


图 12-35　打开盖板的典型三相变压器，表示了三个独立变压器和连接端子

12.15.1　星形联结的三相变压器

图 12-36 为一个星形联结的三相变压器原理图。变压器绕组连接的物理形状像字母 Y，并以此字母命名。此图只显示了变压器二次绕组。讨论变压器配电系统时，通常只显示一次侧连接或只显示二次侧连接，因为在同一个图中同时显示一次侧和二次侧连接往往非常复杂。

对于星形联结变压器，如果其电压比为低压设置，则二次侧端子 L1-L2、L2-L3 及 L3-L1 之间测量的电压值将是 208V。如果变压器电压比为高压设置，则每个端子之间的电压值将是 480 V。图中变压器绕组之间的电压显示为 208V，这表明该变压器的电压比将会提供较低的电压。如果需要 480 V，需要使用具有较高电压比的变压器。每个变压器的一次和二次电压由其数据铭牌提供，并且在购买和安装变压器时可以指定。

12.15.2　三角形联结的三相变压器

图 12-37 表示了一个三角形联结的三相变压器原理图。图中变压器绕组连接的形状像一个三角形（△）。这种形状是希腊字母 D，叫作 delta。此图也只显示了三相变压器的二次侧。

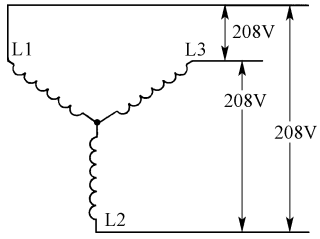


图 12-36　表示一个星形联结的三相变压器的二次绕组的图。该变压器 L1-L2、L2-L3、L3-L1 之间的电压均为 208V

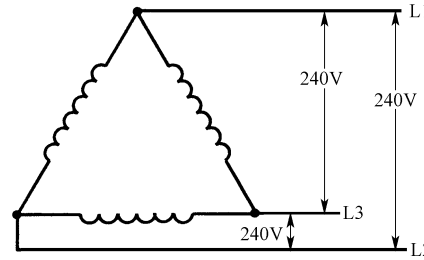


图 12-37　表示一个三角形联结的三相变压器的二次绕组的原理图。注意，该变压器 L1-L2、L2-L3、L3-L1 之间的电压均为 240V

对于三角形联结变压器，如果其接线为了获得较低的电压，L1-L2、L2-L3 及

L3-L1 之间测量的电压值将是 240V。如果三角形联结变压器接线为了获得较高的电压，L1-L2、L2-L3 及 L3-L1 之间的电压是 480V。如果三角形联结变压器接线为了获得较低的电压，很容易与星形联结变压器区分。如果三角形联结变压器和星形联结变压器连接均为了获得较高的电压，则无法区分，因为两者的端子都将提供 480V。

如果需要辨别变压器绕组联结是三角形还是星形，可以检查物理连接，如果有中性点的则为星形联结。此时可以进行额外的电压测量，测量每一相和变压器中性点之间的电压。下一节将说明这些测量。

12.15.3　带中性点的三角形联结和星形联结变压器

图 12-38 表示了带中性点的星形联结变压器和三角形联结变压器。星形联结变压器中性点是绕组的三个末端连接在一起的点，也称为星形点。

三角形联结变压器的中性点实际上是二次绕组 L1 和 L3 之间的中点。该点本质上是变压器绕组的中心抽头。传统上，如果三相变压器使用中性点连接，一般采用连接在 L1 和 L3 之间的绕组。

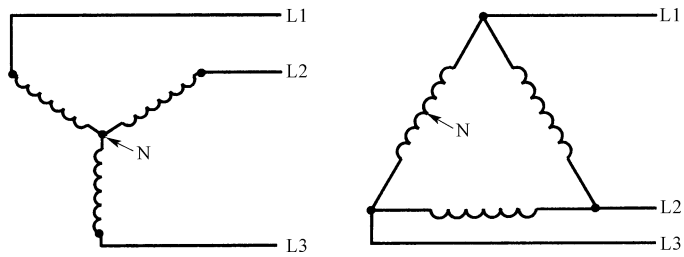


图 12-38　带中性点的星形联结变压器和三角形联结变压器的电气图

图 12-39a 所示的是测得的星形联结变压器 L1 和 L2 端子之间、L1 端子和 N 之间、L2 端子和 N 之间的电压值。L1 和 L2 之间的电压值是 208V，所以该变压器联结方式是为了获得较低的电压。L1 和 N 之间以及 L2 和 N 之间的电压为 120V。图 12-39b 所示的是测得的三角形联结变压器 L1 和 L3 端子之间、L1 端子和 N 之间、L3 端子和 N 之间的电压值。L1 和 L3 之间的电压为 240V，所以该变压器联结方式是为了获得较低的电压。L1 和 N 之间以及 L3 和 N 之间的电压显示为 120V。由于三角形联结变压器的中性点在变压器绕组的正中间，L1-N 和 L3-N 之间的电压将总是恰好为 L1 和 L3 之间电压的一半。

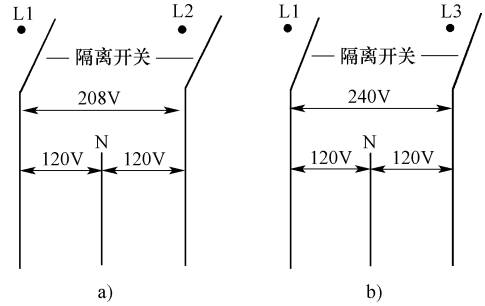


图 12-39　a) 星形联结变压器 L1-L2 之间的电压为 208V，L1-N 或 L2-N 之间的电压是 120V　b）三角形联结变压器 L1-L3 之间的电压是 240V，L1-N 或 L3-N 之间的电压是 120V

星形联结变压器和三角形联结变压

器之间的主要区别是：三角形联结变压器 L1-N 和 L3-N 之间的电压总是 L1-L3 之间电压的一半，星形联结变压器 L1-N 或 L2-N 之间的电压总是大于 L1-L2 之间电压的一半。L1-N 之间电压的准确大小可以用 L1 和 L2 之间的电压除以 1.73 计算，1.73 是 3 的二次方根（$\sqrt{3}=1.73$）。使用 3 的二次方根是因为三相相移之间的关系。请注意，208V 除以 1.73 是 120V。

变压器电压比为了获得更高的电压时，Ll 和 L2 之间以及 L1 和 N 之间的电压存在相同的关系。如图 12-40a 所示，L1 和 L2 之间星形联结电压为 480 V，L1 和 N 之间是 277V。277 V 可以由 480V 除以 1.73 计算。来自 L1-N 或 L2-N 的 277V 一般用于商业楼宇荧光灯照明系统。因为电源电压来自三相变压器，商业或工业建筑照明系统也将采用 L3-N，这样可以使用变压器的所有三个绕组。该电压称为单相电压，因为每个电路只使用了三相变压器的一相。例如，L1-N 是单相电路。

L1-L2、L2-L3 或 L3-L1 的每一个都可以用来为电气系统提供完整的电源。尽管该类型的电源采用变压器的两个绕组，仍然称为单相电源，因为任何瞬间只使用了一相电压。例如，如果系统由 L1-L2 供电，在任何给定的交流电压的半个周期内，系统电源将来自 L1，然后在接下来的半个周期将来自 L2。电源将继续在 L1 和 L2 之间振荡，但在任何瞬间只会使用一相电压。

如图 12-40b 所示，三角形系统 L1-L3 之间较高的电压也是 480V，但此时 L1-N 或 L3-N 之间的电压是 240V。L1-N 或 L3-N 之间的电压也正好是电源电压的一半，因为变压器的中性点是变压器的中心抽头。通过测量 L1-L3 和 L1-N 之间的电压很容易区分星形联结电源和三角形联结电源。如果 L1-N 之间的电压是 L1-L3 之间电压的一半，该系统是三角形联结系统。如果 L1-N 之间的电压大于 L1-L3 之间电压的一半，则为星形联结系统。L1-N 星形电压总可以由 L1-L2 之间的电压除以 1.73 计算。

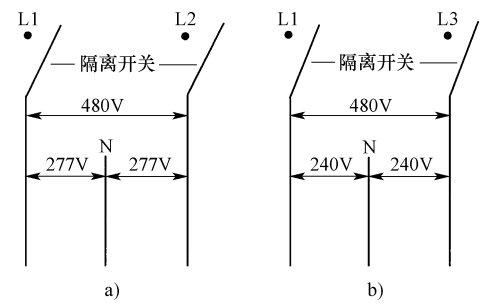


图 12-40　a）星形联结变压器 L1-L2 之间电压为 480V，L1-N 之间电压是 277V　b）三角形联结变压器 L1-L3 之间电压为 480V，L1-N 或 L3-N 之间电压是 240V

12.15.4　High-Leg 三角形系统

三相变压器系统用于电气系统的电源时，可能有一个中心抽头。有时三相系统并不一定需要一个中性点来正常运行，只有当系统某些部分需要较低电压（120V）时，才加入中性点。通常，设备制造商生产的系统元件实用电压要低于系统电压，他们在设备内部提供小型变压器，将较高电压降到所需的电压等级。例如，如果设备需要 208V 三相电压供电，可在设备的电源板上提供一个控制变压器使 L1-L2 之间的 208V 降为 120V 或 24V。120V 或 24V 是为控制回路功率继电器线圈供电的。

由于控制变压器一次侧可以由 L1-L2（208V）供电，该系统不需要中性点。如果需要 120V 供电，则需要一个叫作中性点的中心抽头，这些元器件连接在 L1-N、L2-N 或 L3-N 之间。

如果变压器为三角形联结，L2-N 之间可以得到不同的电压。图 12-41 表示了该电压关系图。从该图中可以看出，该三相变压器的二次绕组采用三角形联结。在 L1-N 和 L3-N 之间的电压为 120V，因此，L1-L2、L2-L3 或 L3-L1 之间的电压为 240V。

在 L2-N 之间可产生不同的电压。由于 L1-L3 之间的绕组有一个中心抽头，理所当然的，L1-N 之间以及 L3-N 之间的电压正好是 L1-L3 之间电压的一半。由于中心抽头没有在 L2-L1 之间，L2-N 之间的电压必须来自一个完整的相（240V）和下一相的一半（120V）。由于此电压使用两相，240V 和 120V 是不同相的，产生的电压为 208V。

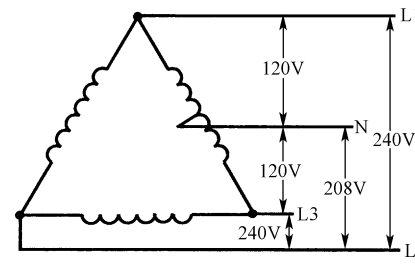


图 12-41　在 L2-N 之间产生的电压，而产生中性点的中心抽头是 L1-L3 绕组的中心抽头

由于 L2-N 之间的 208V 来自两相，如果用来为任何需要 208V 的元器件供电，变压器会过热。因此，该电压称为“High-Leg 三角形电压”，表明其来自三角形联结变压器的 L2-N，并且不能为 208V 元器件供电。与作为三相系统一部分或 240V 单相系统的 L1-L2 或 L2-L3 共同使用时，变压器的 L2 端子非常有用。唯一的问题是，当 L2 端子与中性点配合使用时，L2-N 之间的电压为 208V。

三角形联结系统的任何配电箱中的 L2 端子应该总是用橙色线标志，确定其是 High-Leg 三角形。在一些场合下，High-Leg 三角形也被称为 Wild leg、Red leg 或 Stinger leg 三角形。

12.16　继电器与接触器的原理与特性

继电器是一个磁控开关，是电气系统的主要控制器件。图 12-42 表示了一个典型的继电器，图 12-43 呈现了标明触点和线圈的较小插件型的继电器剖视图。继电器可以由一个线圈和一定数目的触点组成。通电时，线圈变成磁铁，其磁场会导致每个常开触点闭合或者常闭触点打开。触点是由电磁力控制的基本开关。继电器工作并导致触点动作的部分称为衔铁。首先电流通入继电器线圈，磁通引起衔铁动作，并导致触点改变位置。线圈是控制电路的一部分，触点是负荷电路的一部分。

继电器由线圈和触点两个独立的部分组成。尽管它们相互靠近安装并且几乎同时动作，但实际上线圈必须先通电，几秒后线圈内建立的磁场才会导致触点动作。

图 12-42　典型的大型继电器

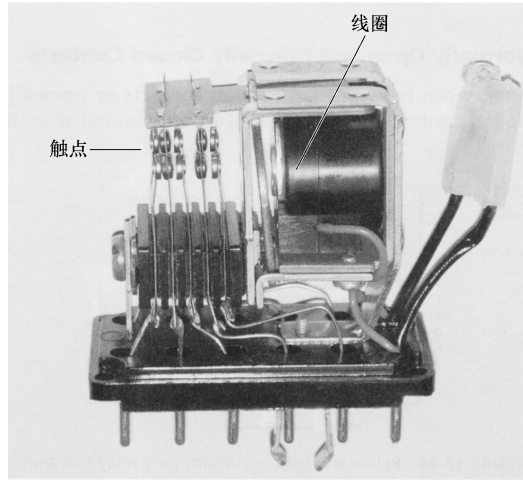


图 12-43　标明线圈和触点的小型继电器

12.16.1　吸合和保持电流

刚开始为继电器线圈通电时，会引起过大的电流，因为当电流开始流动时，线圈只代表线路中的电阻。随着线圈中电流的增加，开始产生感抗，导致电流变小。电流在线圈中产生强磁场，导致衔铁动作。衔铁动作导致电磁线圈的电感发生变化，这样只需要较小的电流即可保持衔铁的位置。

图 12-44 表示了吸合电流和保持电流。吸合电流也称为浪涌电流，保持电流也称为封锁电流。吸合电流通常大于保持电流 3 ~5 倍。

12.16.2　常开和常闭触点

继电器有常开或常闭触点。描述触点的“常”字表明线圈上不施加电压时触点的位置。触点可以通过弹簧或重力保持在通常的位置上。在线圈上施加电压时，继电器的触点将从其正常位置移动到通电位置。

有些类型的触点可以由常开变为常闭，而有些则不能改变。触点可以由技术人员通过简单地将其从继电器移除并颠倒过来改变。常开触点改变时成为常闭触点，常闭触

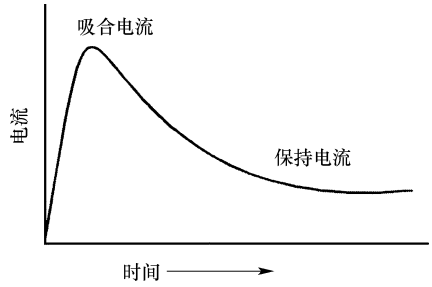


图 12-44　继电器线圈的吸合电流和保持电流。注意，吸合电流约大于保持电流 3 ~5 倍

点改变时成为常开触点。现场的技术人员可以改变继电器的触点，以得到应用中需要的确切数量的常开或常闭触点。

12.16.3 继电器触点和继电器线圈等级

更换一个已磨损或损坏的继电器时，必须确保新的继电器线圈的电压等级与控制电路的电压相匹配。如果控制电路电压为24V交流电，线圈等级必须是24V。如果控制电压为120V交流电，线圈等级必须是120V。继电器线圈的额定电压直接标记在线圈上。线圈也可能有颜色代码。如果线圈等级是24V交流电，颜色代码是黑色。如果线圈等级为120V交流电，颜色代码是红色或者有红色标记在线圈上。如果线圈等级是208V或240V交流电，颜色代码是绿色或有绿色印在线圈上。直流线圈的颜色代码是蓝色。继电器线圈额定电流很少在组件上列出。知道线圈额定电流很重要，可以在与新继电器一起提供的文档或说明书上找到。如果更换继电器，还必须确保触点等级达到或超过所连接负荷的额定电流和额定电压等级。

触点等级分为电压和电流。电压等级一般分为两组，即300V和600V。如果使用触点控制240V或208V交流电，应该使用300V等级的触点。如果使用触点控制480V交流电动机，则需要使用600V等级的触点。

触点的额定电流表示为安培（A）。电流等级必须超过继电器控制的电流值。如果继电器控制12A的电流，触点需要超过12A的额定电流。触点的额定电流和额定电压直接印在触点上或继电器的侧面。

12.16.4 通过触点配置识别继电器

某些类型的继电器触点配置已成为标准化，在更换或试图对其进行故障诊断时，很容易辨识。图12-45表示了一些标准类型的继电器配置例子。图12-45a表示了有一个常开触点的继电器。这种类型的继电器也可以有一个常闭触点，而不是常开触点。由于该继电器只有一个触点，只能闭合或打开，这种类型的继电器称为单刀单掷（SPST）继电器。“刀”这个字在这里指触点数，“掷”这个字是指输入触点可以切换的端子数。由于此继电器触点有一个输入，并且只能切换到一个输出端，称为单掷。

图12-45b表示了有两个常开触点的继电器。由于该继电器有两个触点，称为双刀单掷（DPST）继电器。名字中的“双刀”是指有两个常开触点，名字中的“单掷”是指每个触点有一个输出端。当线圈通电时，两个触点从常开位置移动到常闭位置。

图12-45c表示了有一个常开触点和一个常闭触点并在左侧连接的继电器。连接点称为公共点，标记为字母C。当继电器线圈通电时，常开触点闭合，常闭触点打开。由于这些触点有一个作为输入端的公共点和两个输出端［一常开（NO）和一常闭（NC）］，该继电器称为单刀双掷（SPDT）继电器。该继电器最重要的特点是，触点输出侧有两个端子，因此称为双掷继电器。单刀双掷继电器用于存在两个互斥条件并且不希望同时发生的情况。

图 12-45d 表示了两个单刀双掷触点的继电器，因此称为双刀双掷（DPDI）继电器。在这种情况下，使用术语“双掷”是因为提供了两套常开/常闭触点。每套在左侧（输入侧）有一个公共点，在右侧有一个连接到常开（NO）触点的端子和一个连接到常闭（NC）触点的端子。这种类型的继电器用在需要互斥条件并且负荷采用 208V 或 240V 交流电，需要由 L1 和 L2 供电的地方。在这种类型的应用中，L1 将连接到一组触点的公共端（C），L2 连接到另一组触点的公共端（C）。这将使得 L1 和 L2 在相同的条件下以同样的方式切换。

图 12-45e 表示了多套常开触点的继电器。这种类型的继电器可以有任意数目的常开触点。某些类型的继电器可以在基本触点中加入附加触点。如果继电器按照这一规定制造，可以购买附加触点，将其添加到原始继电器中，放在继电器的顶部并拧紧安装螺钉，使更多的触点与继电器衔铁一起工作。如果应用需要，这种类型继电器的触点可以都是常闭的。这种类型继电器的主要特征是可以有任意数量的触点。

图 12-45f 表示了有多个常开触点和多个常闭触点的继电器，这是与图 12-45e 所示类似的继电器，不同之处在于这种类型的继电器可以是常开或常闭触点的任何组合。在大多数情况下，这种类型继电器的触点是可换的。作为一名技术人员，可以任意添加触点，并根据需要将其从常开变为常闭，反之亦然。在大多数场合中设备中都装有继电器，为了安装与故障诊断的目的，技术人员需要能够识别这些继电器。

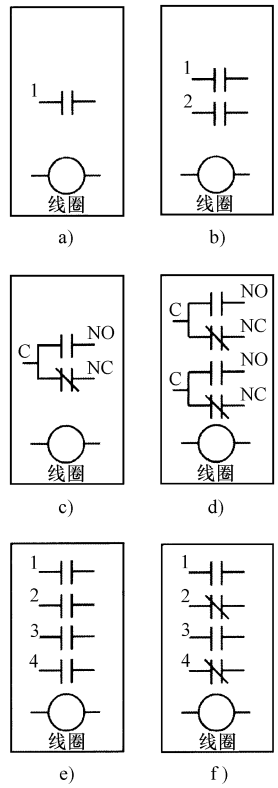


图 12-45　a）有一个常开触点的继电器。这种类型的继电器称为单刀单掷（SPST）继电器　b）有两个触点的继电器。该继电器称为双刀单掷（OPST）继电器　c）有两个触点且在公共点（C）一侧连接在一起的继电器。输出端分为常开（NO）和常闭（NC）。这种类型的继电器称为单刀双掷（SPDT）继电器　d）有两个 SPDT 触点的继电器。该继电器称为双刀双掷（DPDT）继电器　e）有多套常开触点的继电器　f）常开和常闭触点组合的继电器

12.16.5　继电器和接触器的区别

接触器类似于继电器，有一个线圈和一些触点。然而，接触器更大，触点可以携带更大的电流。继电器通常定义为磁控触点，承载小于 15A 的

电流。接触器定义为触点等级是15A或更大。有些制造商并不完全按15A的等级，所以有时会发现触点等级小于15A的接触器。通常，主要的区别在于接触器是专门设计的，其触点可以承载较大的电流，可高达2250A。接触器由美国国家电气制造商协会（NEMA）分级，规格从00到9。也可能用马力（hp）分级。

在大多数系统中，电动机由接触器控制，而不是继电器，因为大多数电动机电流超过15A。观察一个接触器时，可以看到很像一个大继电器。

12.16.6 NEMA对接触器的分级

图12-46表示了NEMA的三相磁接触器和电动机起动器分级表。图中显示出00型号接触器为连续负荷安全承载的最大电流是9A。接触器的额定电压达575V。触点的额定电流取决于触点型号，触点的额定电压取决于继电器的制造方式，使得电弧不在不同端子之间跳跃。较高额定电压的接触器，在触点之间有更多的塑料或绝缘材料，这样电弧不会从触点跳到接触器其他部分或其他触点。此表还列出了最大马力等级的负荷。可以从电流等级或马力等级识别负荷，选择适当的接触器型号来安全地控制负荷。

由该表可知，下一个较大接触器型号为0，在连续负荷情况下，该接触器额定电流达18A。型号9接触器是最大的，其额定电流达2250A。

表2-4-1 三相单速全压磁控制器的马力（hp）和堵转电流（LRA）等级

控制器型号	连续电流等级/A	200V,60Hz		230V,60Hz		380V,50Hz		460V,60Hz		575V,60Hz		服务限制电流等级①/A
		hp	LRA	hp	LRA	hp	LRA	hp	LRA	hp	LRA	
00	9	1.5	46	1.5	40	1.5	30	2	25	2	20	11
0	18	3	74	3	70	5	64	5	53	5	42	21
1	27	7.5	151	7.5	140	10	107	10	88	10	70	32
2	45	10	255	15	255	25	255	25	210	25	168	52
3	90	25	500	30	500	50	500	50	418	50	334	104
4	135	40	835	50	835	75	835	100	835	100	668	156
5	270	75	1670	100	1670	150	1670	200	1670	200	1334	311
6	540	150	3340	200	3340	300	3340	400	3340	400	2670	621
7	810	...	...	300	5000	...	...	600	5000	600	4000	932
8	1215	...	...	450	7500	...	...	900	7500	900	6000	1400
9	2250	...	...	800	13400	...	...	1600	13400	1600	10700	2590

① 参见条款4.1.2

NEMA

4.1.2 服务限制电流等级

服务限制电流等级代表了在正常服务中控制器允许长期承载的最大有效电流，单位为安培。在服务限制电流等级中，允许温升超过检测连续电流等级的控制器的温升。过载继电器的电流等级或者其他电动机保护设备的动作电流不能超过控制器的服务限制电流等级。

图12-46 三相磁接触器的NEMA等级（图片来源：国家电气制造商协会，NEMA）

12.17　电动机起动器的作用

电动机起动器是磁控设备，通常用于大型商业应用中。电动机起动器是一个较大版本的继电器或接触器，用于控制较大的电动机。电动机起动器还具有内置的电动机过电流保护，而继电器和接触器则没有。该过电流保护称为过载保护，如果电动机的电流值超过指定的限制就跳闸。

电动机起动器中的继电器和接触器是用来通过闭合为电动机提供电流而起动电动机的，其主要功能是打开和关闭，为这些电动机提供电流。这些应用中的电动机由装在绕组中的熔断器或内部过载保护来防止过电流。同样，这些电动机也由熔断器或断路器进行短路保护，由电动机起动器中的过载保护防止缓慢的过电流。如果一个电动机发生故障，如润滑不足或超负荷，会吸收额外的电流，如果过载持续一段时间，将会损坏电动机。电动机起动器的过载保护感应到过电流，跳开电动机起动器，其触点打开，中断流向电动机的所有电流，直到技术人员手动复位过载保护。

12.17.1　电动机起动器的基本组成

图 12-47 表示了一个典型的电动机起动器，其所有零件标示于图中。这是一个用于三相电路的相起动器。输入电压连接在标记为 L1、L2 和 L3 的端子顶部，电动机引线连接到标记为 T1、T2 和 T3 端子的底部。三个主要触点位于电动机起动器的顶部，过载保护安装在电动机起动器的底部。线圈位于电动机起动器的中间，有一个指示器，当线圈通电时显示 ON，线圈断电时显示 OFF。

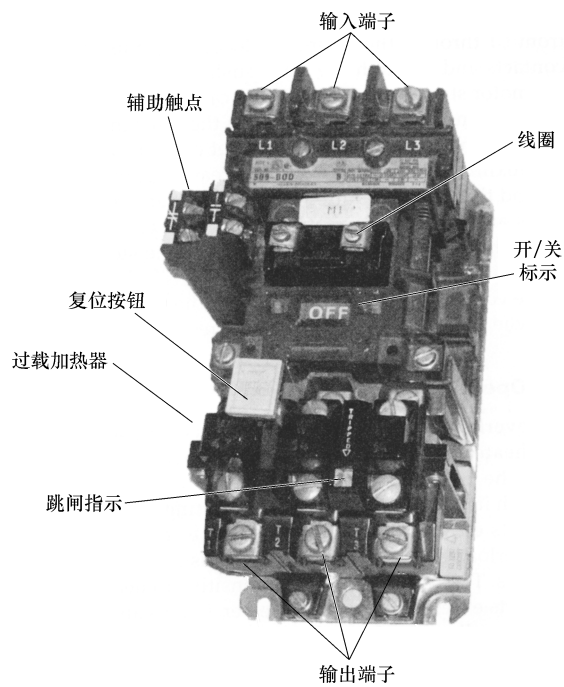


图 12-47　一个典型的电动机起动器

电动机起动器有三个触点，与加热器串联。这确保了流向电动机的所有电流必须通过加热器。如果流向电动机的电流正常，加热器不会提供足够的热量引起过载保护跳闸。如果电动机过电流，通过加热器的电流会使其产生多余的热量，跳开常闭过载保护触点。由于常闭过载保护触点与电动机起动器的线圈串联，当过载保护触点打开时，电动机起动器线圈的电流将会中断。电动机起动器的复位按钮必

须手动复位，使过载保护触点回到常闭位置。

图的底部表示了控制电路梯形图。由此可见，当起动按钮按下时，电动机起动器线圈通电。此处使用手动按钮，因为更容易理解，但电气应用中的大多数电动机起动器是由手动开关或其他类型的控制开关控制的。

电动机起动器还具有一个或更多的常开触点，称为辅助触点。辅助触点与起动按钮并联。电动机起动器线圈通电后，这些触点就会闭合。起动按钮是瞬动型开关，在弹簧座以下处于常开位置。当起动按钮按下时，电流从 L1 经过常闭停止按钮触点，并通过起动按钮触点到达电动机起动线圈。该电流使线圈磁化，吸合三个主要负荷触点以及辅助触点。当辅助触点闭合时，产生与起动按钮触点并联的通路，这样当起动按钮释放时，电流仍然流过起动按钮触点到达线圈。由于停止按钮串联在此电路中，当停止按钮按下时，流向线圈的电流断开，所有的触点释放。

12.17.2 过负荷保护

电动机起动器的过负荷保护由两部分组成。第一部分为加热器，它是与电动机串联的元器件，所有的电动机电流都通过加热器。加热器实际上是将电流转换成热能的加热元件。过负荷保护设备的第二部分是跳闸机制和过负荷触点。跳闸机制对热很敏感，如果检测到来自加热器多余的热量，会跳闸并使得常闭过负荷保护触点打开。由于电动机起动器线圈与常闭过负荷保护触点串联，当过负荷保护触点跳到打开位置时，流向线圈的所有电流中断并且线圈断电。当线圈断电时电动机起动器触点返回其打开的位置，流向电动机的所有电流中断。过负荷保护触点打开时将一直断开，直到过负荷手动复位。这确保了过负荷电动机停止运行并冷却下来，直到有人发现故障并复位过负荷保护。

图 12-48 表示了一个典型的电动机起动器过负荷保护设备的加热元件，称为加热器。在剖视图中可以看到，加热器实际上是一个当电流通过加热元件时能将其转换成热能的加热元件。注意从加热器底部凸出的旋钮。该旋钮有一个在加热器里面固定位置的轴，从加热器凸出的部分加工成齿形，称为棘轮机构。

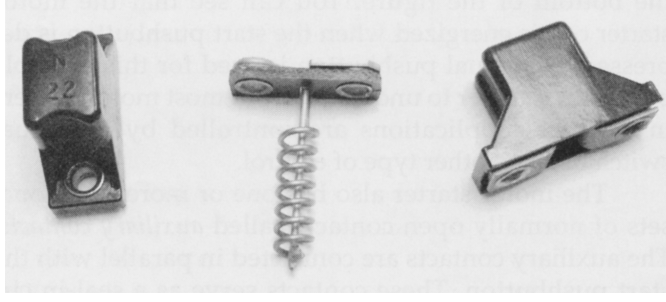


图 12-48 一个典型的加热器组件（注意从加热器底部凸出的棘轮）

图 12-49 表示了过载保护组件的所有部分，包括复位按钮、安装加热元件的轴、棘轮和勾爪机构、过载保护触点以及与触点连接的端子。跳闸机构包括来自加

热器的棘轮和爪。棘轮实际上是从加热器底部凸出的齿旋钮。勾爪有弹簧压力，试图旋转棘轮。由于加热器焊紧了棘轮的轴，勾爪无法移动。当加热器变得过热时，熔化固定棘轮的钎料，并允许其自由旋转。当棘轮旋转时，允许勾爪移动，反过来使常闭触点移动到打开位置。

过负荷情况发生并且过负荷保护触点已经打开后，电动机起动器断电，电动机停止运行。电动机停止运行时，加热元件冷却。加热元件冷却几秒后，可以按下复位按钮，将勾爪移回原来的位置，常闭过负荷保护触点移回其闭合位置。如果重起后，电动机继续过电流，过电流会导致加热器再次跳开过负荷保护机构。如果电动机电流在规定限值以内，加热器不能够产生足够的热量来造成过负荷保护机构跳闸。

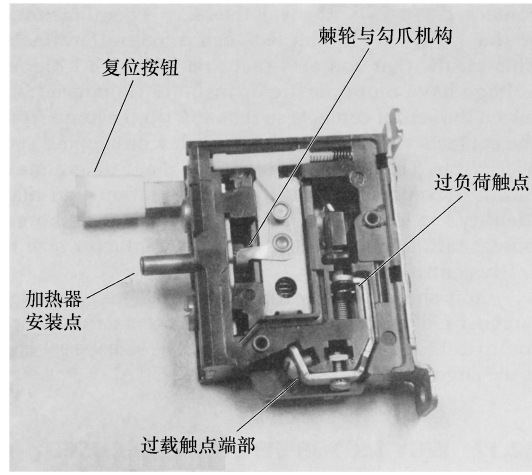


图 12-49　标出所有部分的过负荷保护组件

由于过电流条件必须持续几分钟才能导致过负荷保护机构跳闸，在电动机试图起动的几秒内，过负荷保护允许电动机吸入堵转电流（LRA）而不跳闸。如果运行时电动机有过电流情况，电动机断电前，过负荷保护允许该情况持续几分钟。如果问题持续下去，过负荷保护会检测到过电流并跳闸保护电动机。

12.17.3　电动机起动器的分解图

在电动机起动器分解图中很容易看到所有的组成部分，如图 12-50 所示。在图最左侧，可以看到，电动机起动器主要触点比传统继电器大很多。线圈在图中间，线圈里面有两个方孔，允许磁轭通过其安装。磁轭和线圈安装在可移动触点上。当线圈通电时，向上拉动磁轭，导致可移动触点向上移动，直到接触到最左侧的固定触点。过载保护机构在图最右侧，其安装在电动机起动器的下部，流过触点的所有电流必须流过过载保护机构。

12.17.4　电动机起动器的型号

有时需要为应用选择合适大小的电动机起动器。电动机起动器的型号标准由美国国家电气制造商协会（NEMA）确定。等级包括电动机起动器触点可以安全处理的电流值。电动机起动器的型号标准如图 12-51 所示。由图中可见，最小型号起动器是 00 号，额定电流是 9A，对于连接至 480V 三相 2hp 的电动机，或连接至 240V 单相 1hp 电动机是足够的。1 号电动机起动器额定电流是 27A，对于连接到 480V 三相 10hp 电动机或连接到 240V 单相 7.5hp 电动机是足够的。00 号电动机起动器大约 4in 高，2 号电动机起动器大约 28in 高。通常会使用到 3 号或 4 号的电动机起

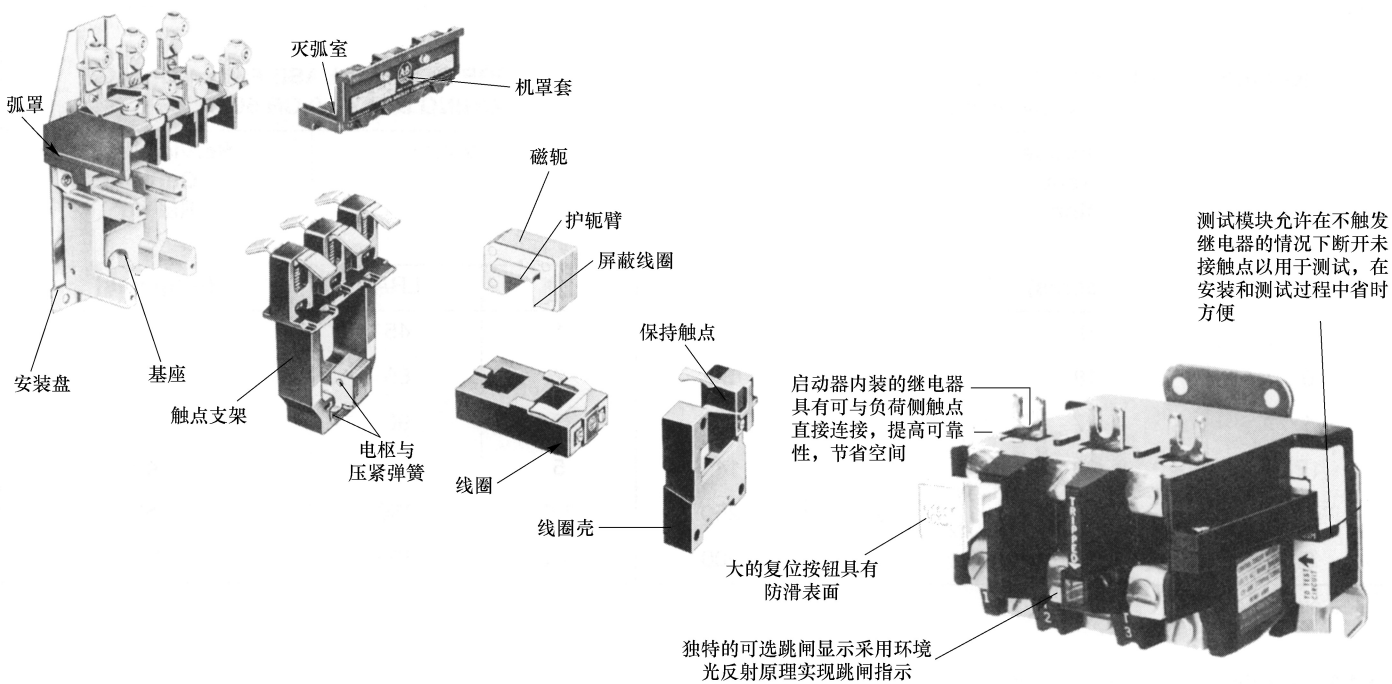


图12-50 电动机启动器的分解图。固定触电在最左侧，可移动触点在固定触电的右侧。线圈和磁轭在中间。过载保护机构在最右侧

表 2-4-2　避开堵塞和低速电流的单相全压磁控制器的马力（hp）和堵转电流（LRA）等级，50 或 60Hz

控制器型号	连续电流等级/A	115V		230V		服务限制电流等级①/A
		hp	LRA	hp	LRA	
00	9	1/3	50	1	45	11
0	18	1	80	2	65	21
1	27	2	130	3	90	32
1P	36	3	140	5	135	42
2	45	3	250	7.5	250	52
3	90	7.5	500	15	500	104

① 参见条款 4.1.2。

4.1.2 服务限制电流等级

服务限制电流等级代表了在正常服务中控制器允许长期承载的最大有效电流，单位为安培。在服务限制电流等级中，允许温升超过检测连续电流等级的控制器的温升。过载继电器的电流等级或者其他电动机保护设备的动作电流不能超过控制器的服务限制电流等级。

图 12-51　单相全压磁控起动器的 NEMA 型号标准。注意，最小电动机起动器的型号是 00，最大的型号是 3（转自 NEMA ICS 2-2000，® 2005）

动器来保护电气系统的电动机。4 号起动器可以保护高达 100hp 的电动机。需要指出的是，电动机起动器的过载保护加热器可以根据特定额定电流订购。每个电动机起动器可以有一个特定额定电流的加热器。

12.18　熔断器

熔断器功能类似于过载保护，除了使用一个发生过电流时会损坏的元件以外。熔断器提供了短路保护，因为过载保护不是为短路发生时保护电动机而设计的。熔断器具有热感应元件，可以承载电流。当电流过大时，熔断器元件感应到所产生的热量，当温度足够高时会熔化。

为了适合不同的应用场合，熔断器有各种尺寸和形状。图 12-52 表示了各种类型的盒型熔断器。每个熔断器的型号由其限制的电流大小决定。当电流值过大时，熔断器熔断体（熔丝）熔化并断开熔断器。单元件熔断器为单一等级提供了保护。这种类型的熔断器一般用于无感负荷，如发热元件或照明应用。双元件熔断器提供两个等级的保护。第一个等级称为缓慢的过电流（过负荷）保护，由焊在接触点并且连接弹簧的熔丝组成。当电动机起动时，引起几秒堵转电流（LRA）。过电流熔断器中产生热量，热量由缓慢过电流熔断体吸收。如果电动机起动并且电流下降到满负荷电流水平，熔丝会冷却下来，熔断器不会断开。如果 LRA 电流持续 30s，产生的

热量会导致保持缓慢过电流熔断体的焊锡熔化。焊锡熔化时，弹簧断开连接，中断流过熔断器的所有电流。缓慢过电流熔断体允许熔断器维持过电流情况很短时间，如果过电流情况清除，熔断器不会断开；如果情况继续存在，熔断器断开。

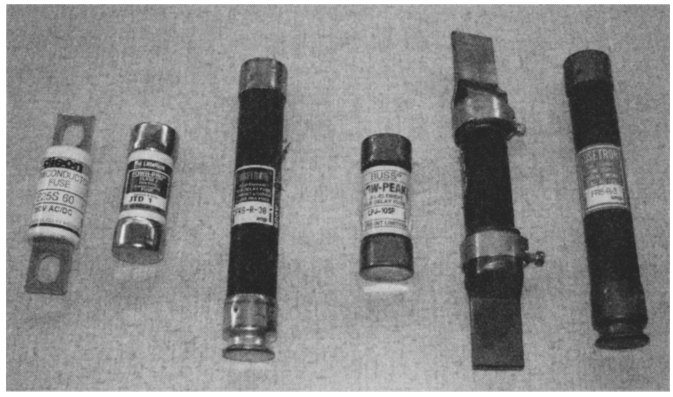


图 12-52　各种类型的熔断器

第二个保护等级采用短路元件。当电流值超过熔断体设计承受的电流水平时，元件立即断开。在双元件熔断器中，短路连接容量约为熔断器额定值的 5 倍。短路定义为电流超过满负荷额定电流的 5 倍（有些制造商用额定值的 10 倍）。

单元件熔断器里面只有一个短路元件。这种类型的熔断器一般不用于电动机起动电路，因为电动机起动时会产生堵转电流。如果单元件熔断器用来保护电动机电路，必须足够大来允许电动机起动，然而保护电动机过电流 20% 通常过大，如果允许发生几个小时，这将最终损坏电动机。

12.18.1　熔断器座

盒式和螺旋式熔断器一般都安装在一个叫作熔断器座的壳体中。熔断器座通常安装在其要保护的设备附近，其有两个目的：①为安装熔断器提供位置；②提供了断开供电电压的方法。三相熔断器座如图 12-53 所示。熔断器座有一个开关手柄，

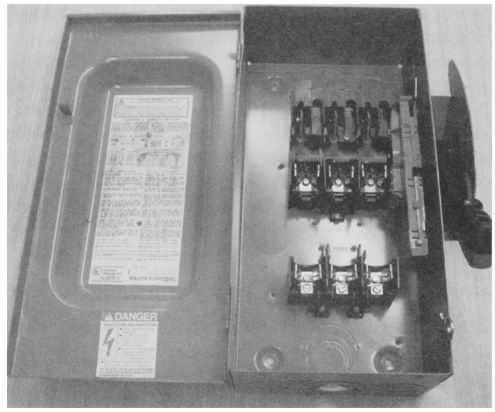


图 12-53　熔断器座中的熔丝与电路其他部分串联

用来从电路断开主电源和熔断器，这样熔断器可以安全地拆除、更换或测试。

安全注意事项：即使熔断器座在断开位置，也要始终使用塑料熔断器扳手进行拆除和替换，以保护免受电击。即使开关手柄断开，线电压仍存在于断开的端子顶部。切勿使用金属钳子或螺钉旋具拆除熔断器。

12.18.2　断路器与负荷控制柜

断路器类似于热脱扣器，是一种机电设备，检测过电流和多余的热量，还有些断路器检测磁力。断路器安装在叫作负荷控制柜的电气柜内。负荷控制柜可为三相电路或单相电路设计，单相柜面板提供 240V 和 120V 交流电路。图 12-54 表示了一个典型的负荷控制柜，在上面没有安装任何断路器。

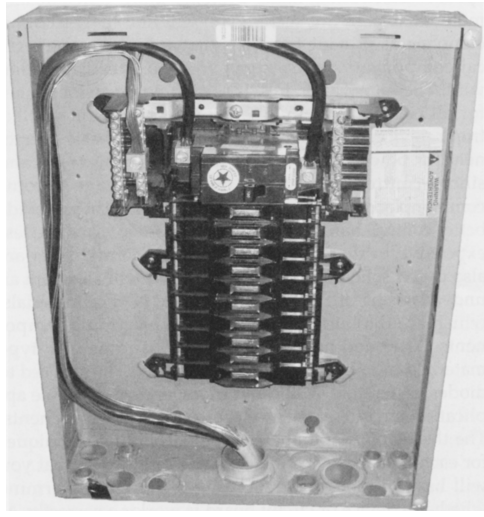


图 12-54　安装了断路器的负荷控制柜。负荷控制柜有时称为断路器柜

断路器按三种基本配置生产，当应用于单相 120V 交流电时，需要一条电源线；当应用于单相 240V 交流电时，需要两条电源线；当应用于三相交流电时，需要三条电源线。三相断路器只能安装在三相负荷控制柜，这是专为三相电路设计的。两相和单相断路器可以安装在单相或三相负荷控制柜。

断路器的操作类似于热脱扣器，感应过电流，经过一个特定的时间跳开电路。断路器和热脱扣器的主要区别是，断路器安装在负荷控制柜，同时保护导线以及负荷。断路器按导线总额定电流和导线连接的总负荷确定型号。在某些情况下，这意味着断路器按流向电动机的电流确定型号。在这些电路中，可能有必要使用断路器保护整个电路，并且每个电动机的过载保护防止其过热。这意味着，断路器主要工作是保护电路防止短路情况，保护整个电路防止过电流情况，而不是保护单个电动机防止过电流。这就是为什么许多电路有断路器和过载装置的组合。图 12-55 所示为单相和三相断路器的例子。

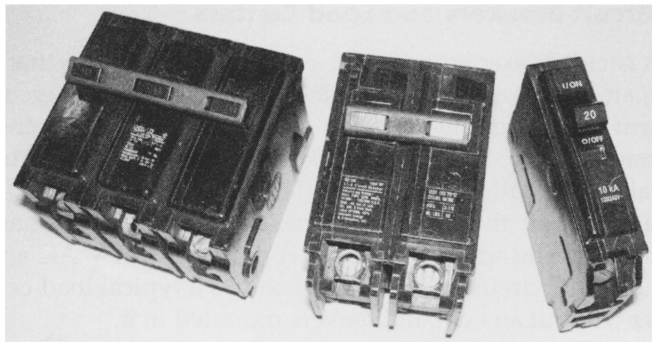


图 12-55 负荷控制柜采用的单相、双相和三相断路器

12.19 逆变器与电路中的电子元器件

电力电子器件被用在风力机控制系统的许多部分，如将直流电压转换成交流电压的电力电子变换器（逆变器），在电路中控制比例液压阀，在变频驱动器中控制电动机转速。电力电子器件使系统更加有效和可靠。在本节中，读者会发现电力电子元器件提供的功能类似于已经熟悉的电气元器件和系统。本节将介绍典型电力电子元器件的名称，并解释其工作原理，如电源和逆变器的基本元件二极管、晶体管和晶闸管（SCR）。电力电子元器件在电力系统中司空见惯，因为其提供了比机电设备更好的控制性能以及较低的制造成本。电子元器件也称为固态元件。本节还介绍了 P 型材料和 N 型材料，它们是所有电子元器件的基石。对 P 型材料和 N 型材料有了基本了解之后，本节将引入二极管、晶体管、晶闸管内容，介绍这些类型元器件的应用电路。每类设备的工作原理和故障诊断技术也将得到说明，这样能很好地理解如何确定设备或电路是否工作正常。起初，大多数风电技术人员认为很难对电子设备进行故障诊断，因为看不到其运行状况。在充分了解每个元器件和基本电路的工作原理后，则能很容易确定元器件是工作正常还是出现故障必须更换。在本节中还说明了，如果确定一个元器件或电路有故障，将更换完整的设备或电路板，而不是试图修复单个元器件。每个元器件都有一个特定的测试，可以证明电子设备是完好的或故障的。

12.19.1 导体、绝缘体和半导体

本章前面介绍了原子包括在原子核中的质子和中子，以及在电子层上围绕原子核运动的电子。每种元素的原子中的电子数是不同的。例如，铜有 29 个电子，其中 3 个位于最外层。最外层称为价电子层，该层上的电子称为价电子。稳定性最强的材料的原子有 8 个价电子，是 4 对。1 个原子可能有 5、6、7 个价电子，这将需要少量的能量来补充电子得到满层（8 个）；也可能有 1、2 或 3 个价电子，这将需要少量的能量来放弃这些电子达到 8 个电子的稳定配置。

导体是一种允许电子（电流）很容易流过的材料，绝缘体不允许电流流过。导体的例子有用于制作导线的铜，绝缘体的例子有橡胶或塑料。导体的原子结构使得电子更容易流动，绝缘体的原子结构使得电子几乎不可能流动。

图 12-56 表示了一个导体的简化原子结构。导体的原子可以有 1、2 或 3 个价电子。本例中的原子有 1 个价电子。由于所有原子都会得到或失去足够的电子，以实现价电子层 8 电子（4 对）的配置，导体需要较少的能量放弃这些电子（1、2 或 3 个），这样价电子层就空了。此时原子趋于稳定，因为里面的层变为价电子层，有 8 个电子。放弃的电子可以作为电流自由移动。

图 12-57 表示了一个绝缘体的简化原子结构。绝缘体有 5、6 或 7 个价电子。在本例中，原子有 7 个价电子。这种结构很容易让绝缘体获得一个额外的电子达到 8 个价电子。被捕获以填补价电子层的电子通常也可以作为电流自由流动。

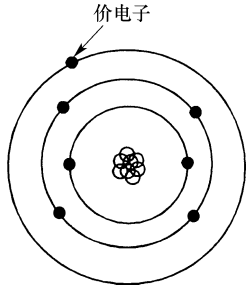


图 12-56　一个导体的简化原子结构

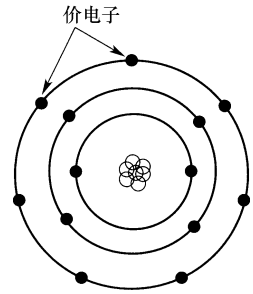


图 12-57　一个绝缘体的简化原子结构

半导体是其原子正好有 4 个价电子的材料。由于这些原子正好有 4 个价电子，可以像绝缘体一样得到 4 个新的价电子获得一个完整的价电子层，也可以像导体一样放弃 4 个价电子获得一个空的最外层。然后里面的有 8 个电子的电子层成为价电子层。图 12-58 表示了一个半导体材料的简化原子结构。

12.19.2　结合原子

固态材料或其他材料是由大量的原子堆放在一起构成的。该结构非常稳定，称为晶格结构。图 12-59 表示了原子结合起来产生的晶格结构的例子。在该图中可以

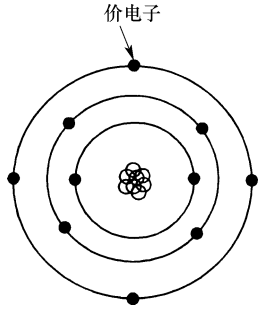


图 12-58　一个半导体材料的简化原子结构

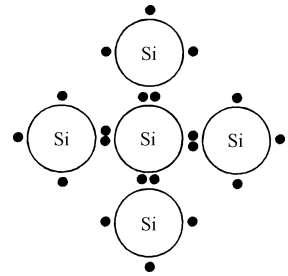


图 12-59　半导体材料硅原子结合形成晶格结构

看到，硅（Si）原子是一种半导体材料，有 4 个价电子，每个价电子与邻近的原子共用一个电子相结合，这样所有的原子就像有了 8 个价电子。

12.19.3　砷和硅结合形成 N 型材料

一些其他类型的原子可以通过与半导体原子结合形成用于固态晶体管和二极管的特殊材料。图 12-60 表示了 4 个硅原子结合一个砷原子的图。在该图中可以看到，砷有 5 个价电子，当硅原子与其结合时，产生非常强固的晶格结构。每个硅原子捐赠一个价电子与砷原子的每个价电子配对。由于砷原子有 5 个价电子，有一个电子不会配对，将从原子中失去。该电子称为自由电子，可以传导很少的能量。由于这种新材料有一个自由（负电荷）电子，称为 N 型材料。

12.19.4　铝和硅结合形成 P 型材料

一个铝原子也可以通过与半导体原子结合产生称为 P 型材料的特殊材料。图 12-61 表示了 4 个硅原子结合 1 个铝原子的图。在该图中可以看到，铝有 3 个价电子，当硅原子与其结合时，产生非常强固的晶格结构。每个硅原子捐赠 1 个价电子与铝原子的每个价电子配对。由于铝原子有 3 个价电子，4 个铝电子中有 1 个不会配对，将有一个空间，任何自由电子可以移动进去，与单个电子结合。该自由空间称为空穴，认为带一个正电荷，因为其不是由一个带负电的电子占据。由于这种新材料有一个带正电的空穴，称为 P 型材料。

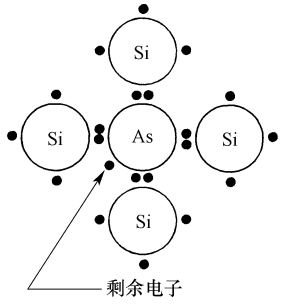


图 12-60　4 个硅原子和 1 个砷原子结合形成的 N 型材料

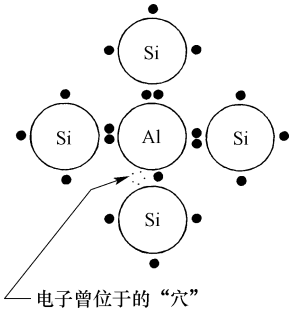


图 12-61　4 个硅原子和 1 个铝原子结合形成的 P 型材料

12.19.5　PN 结

P 型材料可以与 N 型材料相结合形成 PN 结。图 12-62 表示了一个典型的 PN 结。PN 结构成电子元器件二极管。二极管是最简单的电子元件。当直流电压按照正确极性施加在 PN 结上时，导致其成为一个良好的导体。反之，如果电压极性是相反的，PN 结成为一个良好的绝缘体。

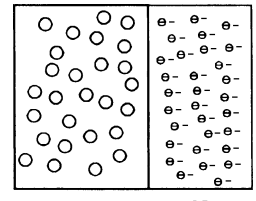


图 12-62　P 型材料和 N 型材料相结合的例子

12.19.6　PN 结正向偏置

当直流电源的电压加在 PN 结上时，正电压连接

到 P 型材料，负电压连接到 N 型材料，PN 结正向偏置。如图 12-63a 所示，电源连接到 PN 结，使其正向偏置。在该图中可以看到，正电源电压导致 P 型材料中的大多数空穴被排斥，从而使得自由空穴向结移动，在那里与 N 型材料接触。与此同时，负电源电压也排斥 N 型材料中的自由电子向结移动。由于空穴和自由电子在结处接触，电子与空穴重新结合形成低阻结，允许电流自由流过。当 PN 结具有小电阻时，允许电流通过，就像是一个闭合的开关一样。

本文至此，所有的电流描述为常规电流，这基于电流从正端流向负端返回的理论。然而现在可以看到，该理论将不支持通过电子设备的电流。因此，讨论电子设备时，必须使用电子流理论。在电子流理论中，电流是电子的流动，在任何电子电路中，都是从负极流向正极。

12.19.7　PN 结反向偏置

如图 12-63b 所示，电源连接到 PN 结，使其反向偏置。在该图中，正电源电压连接到 N 型材料，负电源电压连接到 P 型材料。P 型材料上的负电压吸引了 P 型材料大多数空穴，使其离开结。因此，无法接触到 N 型材料。与此同时，连接到 N 型材料上的正电压吸引了自由电子离开结。由于空穴和自由电子都被吸引离开了结，没有电子可以与任何空穴重组。因此，形成一个高阻结，不允许任何电流流动。当 PN 结具有很大的电阻时，不会允许任何电流通过，就好像是一个断开的开关。

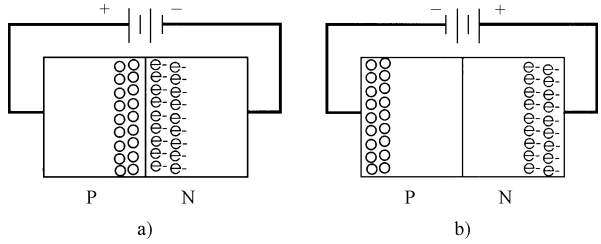


图 12-63　a）正向偏置 PN 结　b）反向偏置 PN 结

12.20　二极管整流技术

在电子电路中很难操作交流电压。随着电力电子器件的问世，直流电压和电流可以操作（转换），以控制电气系统中的各种元器件，如逆变器、比例液压阀以及其他频率控制系统。由于大多数设备是由交流电压供电，要求电子元器件将电压变成直流电压，这样更容易转换。使用一个或多个二极管将交流电压转换成直流电压。电子二极管是一个简单的 PN 结，图 12-64 表示了二极管的符号。由图可见，二极管的符号像一个箭头指向一条线。该符号的箭头部分称为阳极，也是 PN 结的 P 型材料。二极管的另一个端子称为阴极，是 N 型材料。由于阳极由 P 型材料制

成，标为 + 符号。阴极标为 – 符号，因为其由 N 型材料制成。交流电源产生一个正弦波，正半周期后面跟着负半周期。当交流电压提供给 PN 结正向偏置时允许电流通过二极管，当交流电压提供给 PN 结反向偏置时阻止电流流过，基于这个原理二极管可将交流电正弦波转换成半波直流电压。当交流电压正弦波给阳极提供正电压，给阴极提供负电压时，产生正向偏置条件。在交流周期的正半波中，二极管正向偏置，具有非常低的电阻，因此电流可以流动。在交流正弦波的另一半（负半波），二极管变为反向偏置，负电压加在阳极上，正电压加在阴极上。此时，二极管反向偏置，形成高阻结，电流不能流过。

图 12-64 a）二极管 PN 结 b）二极管电子符号。阳极是符号的箭头部分，阴极是另一端

整流器用来将交流电压转变为直流电压（该过程称为整流），二极管的主要功能之一是将交流电压转换为直流电压。用于设备中的大部分电子电路需要直流电压来工作，但设备一般由交流电压直接供电，故二极管是设备电源的一部分，将交流电压整流为直流。

12.20.1 半波和全波整流器

当电路中用一个二极管将交流电压转换成直流电压时，称为半波整流，因为只有交流电压的正半部分允许电流通过二极管，而负半部分电流受阻。图 12-65 所示的整流器是一个半波整流器。半波整流器的效率不是很高，因为交流正弦波的一半被浪费了。

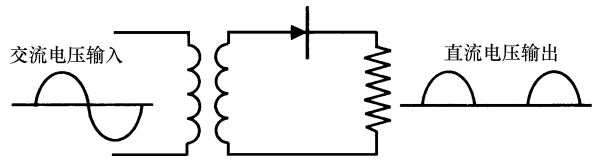


图 12-65 一个二极管用于电路中，将交流电压转变成直流电压

如果在电路中使用 4 个二极管，可以转换交流正弦波的正半波和负半波。图 12-66 表示了一个具有 4 个二极管的桥式整流电路，用来将交流电压整流为直流电压。由于 4 个二极管可以转换交流正弦波的正半波和负半波，这种类型的整流器称为全波整流器。图中的全波桥由 4 个二极管组成。有时通过在电路板上安放 4 个二极管，将 4 个二极管打包成有 4 个引线的集成电路（IC）。两根引线标为 AC，给桥提供交流电压。另外两个标为 DC + 和 DC – ，这些引线为桥的直流输出端子。如果桥式整流器中只有一个二极管坏了，桥将提供约一半的额定电压。如果桥式整流器

中有两个或更多的二极管坏了，直流输出电压通常为零。

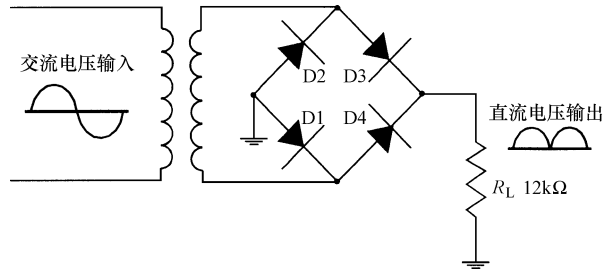


图 12-66　4 个二极管全波整流器。这种类型的整流器称为全波桥式整流器，因为二极管连接在桥式电路中

12.20.2　三相整流器

通过改变电压频率可以对电动机进行调速使其更高效地运行。在这些应用场合中，一般使用 6 个二极管将三相交流电压转变成直流电压，然后借助微处理器控制电路将直流电压逆变为三相交流电压。这个电压的频率可以调节，以改变电动机的转速。图 12-67 表示了 6 个二极管组成的三相整流器。注意，二极管的电源电压是三相交流电压，整流器的输出电压由 6 个正半波组成。

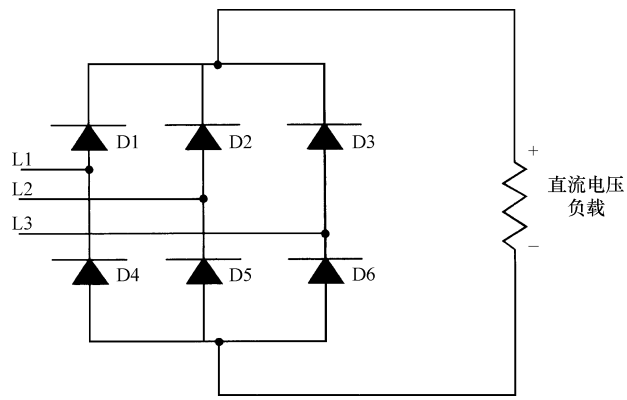


图 12-67　使用 6 个二极管将三相交流电压整流成直流电压

电池充电应用和电动机驱动中的大多数电源使用三相交流电压，而不是单相电压。这些电路的整流器必须使用三相桥，由 6 个二极管提供全波整流（三相的每一相有两个二极管）。图 12-68 表示了三相桥式整流器的电气图。在该图中可以看到，三相变压器的二次绕组连接到二极管整流器。来自变压器三相电压的 A 相连接到二极管 1D 阴极与二极管 2D 阳极相连的点。B 相连接到二极管 3D 阴极与二极管 4D 阳极相连的点。C 相连接到二极管 5D 阴极与二极管 6D 阳极相连的点。二极管 1D、3D 和 5D 的阳极连接在一起，为输出电压的直流负端提供公共点。二极管 2D、4D 和 6D 的阴极连接在一起，为输出电压的直流正端提供公共点。

确定二极管整流器连接的一个很好的原则是，交流输入电压连接到桥上任何两个二极管阳极和阴极连接在一起的地方。对于四二极管桥来说，两条交流线分别接在桥电路中两个这样的点上，不考虑极性，因为输入交流电压没有特定的极性。电源的正端连接到桥上二极管的两个阴极连接在一起的地方，负端连接到桥上二极管的两个阳极连接在一起的地方。

图 12-68 表示了电源供给桥的三相正弦波以及输出脉冲直流电压的 6 个半波的波形。由于 6 个半波重叠，直流电压不能到达零电压点，因此，直流输出电压平均值非常高。

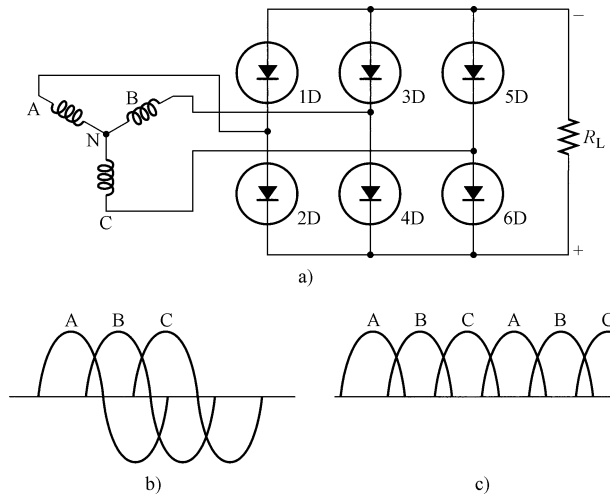


图 12-68　a）连接到三相变压器二次绕组的三相桥式整流器的电气图
b）三相输入正弦波　c）直流输出的 6 个半波

三相全波桥式整流器用于所需直流电源很高以及变压器效率高的地方。由于输出半波的波形重叠，提供了低纹波百分比。在该电路中，输出纹波是输出频率的 6 倍。由于纹波百分比很小，输出直流电压可以直接使用，不用滤波。这种类型的整流器可以采用星形或三角形联结变压器。

12. 20. 3　测试二极管

作为技术人员，测试二极管来判断其是否运行正常是其经常执行的任务之一。做到这一点的一种方法是在二极管电路输入端施加交流电压并测试二极管电路输出端的直流电压。如果直流电压为四二极管桥式整流电路额定值的一半，可以怀疑一对二极管中有一个或两个断开。如果发生这种情况，可以断开所有二极管的电压，使用电阻表测试每一个二极管，以确定哪一个发生故障。

用电阻表测试二极管时，需要将所有的二极管电路的电源关闭。前面几章介绍过，电阻表使用内部电池作为直流电压源。既然知道二极管可用直流电压源测试正向偏置和反向偏置，就可以使用电阻表作为电压源，用仪表测试通过二极管结的高

阻和低阻。如图 12-69a 所示，把电阻表的正端加在二极管的阳极上，把电阻表的负端加在二极管的阴极上，使得二极管正向偏置。在该测试中二极管正向偏置，电阻表应该测到低电阻。当电阻表接线相反时，如图 12-69b 所示，仪表负极引线连接到二极管的阳极上，正极引线连接到二极管的阴极上，二极管反向偏置。当二极管反向偏置时，电阻表应该测到无穷大（∞）电阻。如果反向偏置时二极管显示高电阻，正向偏置时显示低电阻，二极管是完好的。如果正向和反向偏置测试时，二极管都显示低电阻，二极管短路。如果在这两项测试中二极管显示高阻，二极管开路。

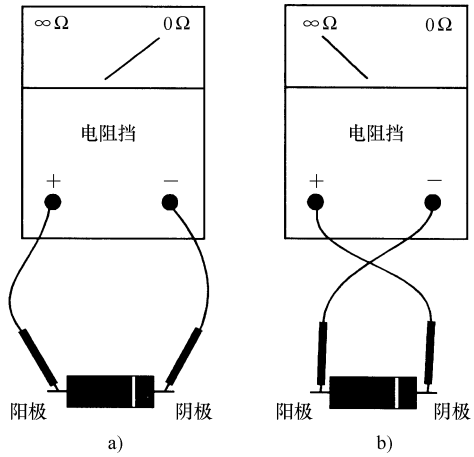


图 12-69　a）用电阻表中的电源使二极管正向偏置。在该测试中二极管应该是低阻
b）用电阻表中的电源使二极管反向偏置。在该测试中二极管应该是高阻

12.20.4　用电阻表识别二极管端子

电阻表不仅可以用来判断一个二极管是完好的还是故障的，相同的测试方法还可以用来确定哪个端子是二极管的阳极，哪个是阴极。使用电阻表测试二极管正向和反向偏置时，应该注意到，当二极管反向偏置时，电阻表显示高电阻，当二极管正向偏置时，电阻表显示低电阻。当仪表显示低电阻时，可知二极管正向偏置，因此正极引线接触到的是阳极，负极引线接触到的是阴极。测试任何二极管时，该方法均有效。如果二极管有标记，可以识别二极管的阴极为周围有带状环绕的一极。图 12-70 表示了两种类型的二极管，均已标明阳极和阴极。

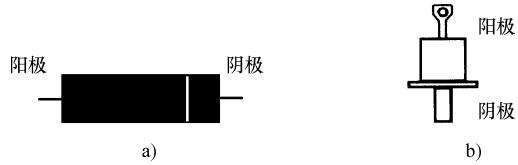


图 12-70　a）典型二极管，阳极和阴极标出
b）电力二极管，阳极和阴极标出

12.21 发光二极管

发光二极管（LED）是一种特殊的二极管，因为当电流通过时会发光，常用作指示器。图 12-71a 表示了一个典型的 LED，图 12-71b 表示了其电气符号。在图中，发光二极管看起来像一个小指示灯。发光二极管在各种控制设备中非常常见，如恒温器。发光二极管和白炽灯之间的主要区别是，LED 没有灯丝，因此可以无故障运行数千小时。

LED 必须连接在正向偏压电路中。由于典型的 LED 需要大约 20mA 发光，通常与 600～800Ω 限流电阻串联。如果电压更高，电阻值将更大。如图 12-72 所示，连接 7 个 LED 来构成七段显示器。七段显示器可以显示 0～9 的所有数字，七段显示器可用于显示恒温器和其他电子设备上的数字。

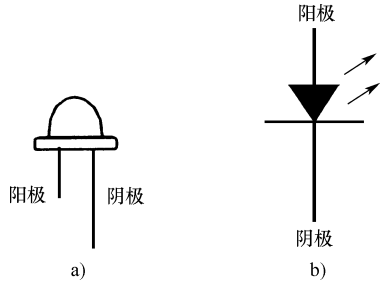


图 12-71 a）典型发光二极管（LED）注意，发光二极管看起来像一个小指示灯 b）LED 符号

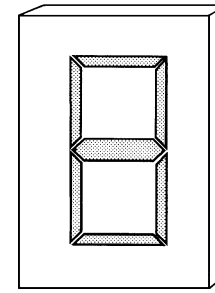


图 12-72 LED 用于七段显示器，七段显示器可以显示数字 0～9

LED 也用于将较大的电压信号与较小的计算机信号隔离开的光隔离电路。LED 与光敏晶体管封装在一起，当有输入信号输入时，导致电流流过 LED，LED 发出的光作用在光敏晶体管上，使其导通并将信号传递给计算机。

12.22 PNP 型与 NPN 型晶体管

两个 N 型材料可以和一个 P 型材料相结合，形成一个 NPN 型晶体管。类似的，两个 P 型材料可以和一个 N 型材料相结合，形成一个 PNP 型晶体管。图 12-73 表示了 PNP 和 NPN 型晶体管的电子符号以及结构。晶体管的端子分为发射极、集电极和基极。基极是中间端子，发射极是箭头端子。在晶体管中，电子从发射极发出，由集电极收集，电流值由加在基极上的电压控制。

12.22.1 晶体管的工作原理

晶体管可以连接在电路中执行各种功能。晶体管最简单的功能是作为电子开

关。图 12-74 表示了作为电子开关使用的晶体管。在这类应用中，晶体管的基极就像继电器的线圈，发射极-集电极电路就像继电器的触点。当合适的直流电压值和极性加于晶体管的基极上时，集电极和发射极之间的电阻比较低，这使得电路的较大的电流流过发射极-集电极电路。此时的晶体管就像一个线圈通电的继电器。

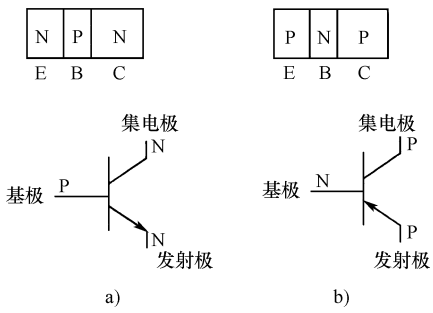


图 12-73　a）NPN 型晶体管的电子符号和结构图
b）PNP 型晶体管的电子符号和结构图

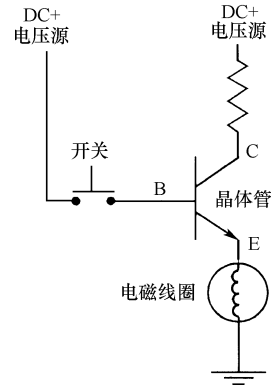


图 12-74　用于电子开关的晶体管

当晶体管基极电压极性相反时，发射极-集电极电路变为高阻电路，就像一个线圈断电的继电器。晶体管的主要优点是基极上很小的电压或电流就可以将晶体管从高阻状态切换为低阻状态。由于基极电流很小，通过集电极的电流非常大，晶体管称为放大器。晶体管用于各种应用中，包括电动机保护电路、逆变器和变频电动机驱动器。

图 12-75 表示了像两个 PN 二极管电路的 PNP 型晶体管和 NPN 型晶体管。每个晶体管所示的等效二极管电路表明了每个二极管中的 PN 结是如何一起工作的。每个晶体管由两个 PN 结构成，每个结像单结二极管一样具有正向偏置（低阻）和反向偏置（高阻）的特性。如果工作中会接触很多由电子电路构成的系统，可以购买商业型晶体管测试仪，测试电路内或电路外的晶体管。

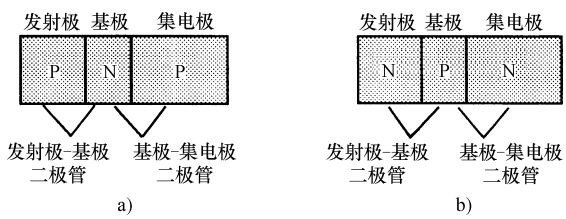


图 12-75　a）表示为等效 PN 结的 PNP 型晶体管。每个 PN 结具有正向和反向偏置特性　b）表示为等效 PN 结的 NPN 型晶体管

12.22.2　典型晶体管

可以通过外形识别晶体管。小型晶体管用于开关控制电路，用于功率控制的较

大型晶体管安装在散热片上，可以很容易地传递热量。图 12-76 表示了晶体管类型的例子。

12.22.3 对晶体管进行故障诊断

晶体管可以通过检查每个 PN 结的正、反向电阻来进行测试。图 12-77 表示了这些测试。由此可见，每次电阻表的电池使 PN 结正向偏置，电阻很小，当电池使结反向偏置时，仪表指示高电阻。如果晶体管已经从电路拆除，可以用这种方式测试晶体管。当晶体管连接在电路中时，还可以用商业型晶体管测试仪测试晶体管。晶体管测试仪的测试结果与前述类似。

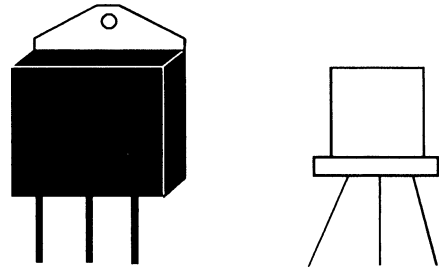


图 12-76 用于功率控制和开关控制的典型晶体管

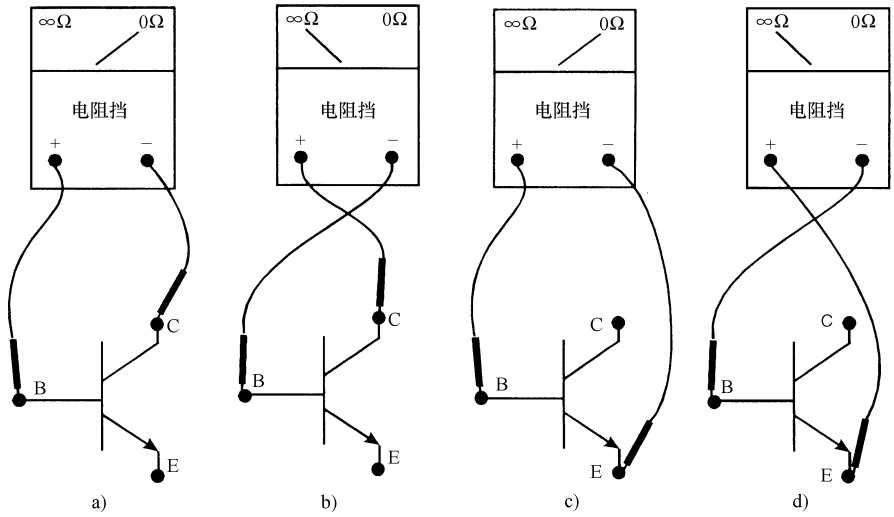


图 12-77 a）测试一个 NPN 型晶体管的基极-集电极结的正向偏置 b）测试一个 NPN 型晶体管的基极-集电极结的反向偏置 c）测试一个 NPN 型晶体管的基极-发射极结的正向偏置 d）测试一个 NPN 型晶体管的基极-发射极结的反向偏置

12.23 晶闸管

晶闸管（SCR，曾称可控硅整流器）由 4 个相结合的 PN 材料构成。图 12-78a 表示了 SCR 的 PN 材料，图 12-78b 表示了其电子符号。SCR 的端子分为阳极、阴极和门极。由于 SCR 基本上是一个由门极控制的二极管，其符号使用本章前面介绍过的整流二极管的箭头。当 SCR 导通时，可传导很大的直流电压和电流（超过 1000V 和 1000A）通过其阳极和阴极。SCR 和二极管的主要区别是，当二极管正向偏置时，电流就能从一个方向通过二极管。当正电压施加在阳极上，负电压施加在

阴极上时，SCR 正向偏置。此时，SCR 的阴极-阳极结上仍然是高阻。如果一个正电压脉冲施加到 SCR 的门极上，SCR 的阳极-阴极结将是低阻，SCR 将导通。当脉冲从 SCR 的门极移除时，其保持导通，因为通过阳极的正电流将代替门极输入的电压。关闭 SCR 的唯一方法是在阳极-阴极提供反向偏置电压或减少流过阳极-阴极的电流至零。在提供负半周波前，交流正弦波电压有零电压。如果 SCR 由交流电压供电，当交流波形通过 0V 然后进入负半周期时，SCR 将关闭。当交流电压波形再次变成正的，可以提供一个门极脉冲，SCR 再次导通。可通过门极输入用来使 SCR 导通的脉冲。

12.23.1　SCR 的工作特性

如图 12-79 所示，SCR 连接在电路中来控制直流负荷的电压。该电路的电源电压为交流电压。SCR 的主要优点是只有其门极接收到脉冲电压才能导通。脉冲时间可以控制，这样可以通过在半个周期内的任何时候施加脉冲信号，来控制 SCR 导通时间。SCR 导通的时间将控制通过 SCR 流向负荷的电流值。如果 SCR 在每半个周期立即打开，其将会导通整个半波的直流电压，就像一个正常的二极管整流器。如果门极延迟了 SCR 打开的时刻，在半波的 45°点导通，SCR 传导的电压和电流值将是整个外加电压的 50% 。

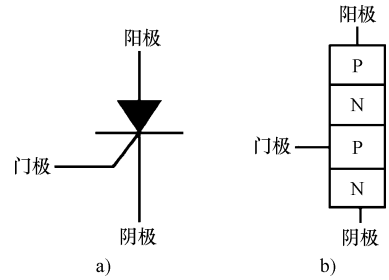


图 12-78　a）晶闸管的电子符号 SCR 的端子为阳极、阴极和门极 b）SCR 中的 P 型材料和 N 型材料。P 型材料和 N 型材料结合在一起形成 PNPN 结

SCR 的另一个重要特点是，只有当阳极和阴极正向偏置时才会导通。如果电源电压为交流，只有在交流电压正半周期中，SCR 才会导通。负半周期时，阳极和阴极将反向偏置，没有电流流过。交流正弦波负半周期时，SCR 将自动关闭。由于交流正弦波正半周期持续 180°，SCR 只能控制整个 360°交流正弦波的 0°～180°。

由于 SCR 关闭的点固定为正弦波开始变负的点，只能通过调节导通的点来控制 SCR。SCR 打开并导通的时刻对应的角度称为触发延迟角。如果 SCR 在交流正弦波的 10°点打开，其触发延迟角为 10°。如果 SCR 在 45°点打开，其触发延迟角为 45°。SCR 保持导通的角度数称为导通角。如果 SCR 在 10°点打开，其导通角将是 170°，这是交流正弦波正半周期 180°的其余部分。

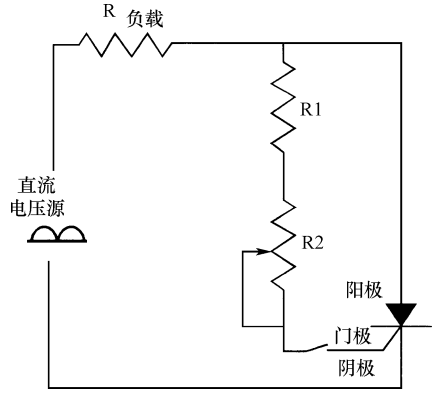


图 12-79　在电路中控制负荷直流电压和电流的 SCR

12.23.2 控制 SCR

图 12-80 表示了电路中有一个单结晶体管（UJT，只有一个结的晶体管）连接到门极的 SCR。该电路的负荷是直流电动机，这种类型的直流电动机通常用来作为小型控制电动机。该电路由交流电压供电，振荡器中的可变电阻（电容电阻）电路用来给 SCR 门极供电的脉冲设置时间。二极管整流器为电容器提供脉冲直流电压，通过电容器充电为来自 UJT 的脉冲设置时间。由于该直流电压来自原来的交流电源电压，将与原始正弦波有相同的时序关系。调节来自 UJT 的脉冲，在适当的时间打开 SCR 的门极来控制 SCR 从 0°～180°范围内的触发延迟角。实际上，通常触发延迟角控制在 0°～90°之间，这给出足够的控制范围来调节输出直流电压，施加到直流电动机。直流电动机转速可通过调节供给电枢和励磁的电压来控制。该电路中的负荷也可以是其他直流供电的负荷。

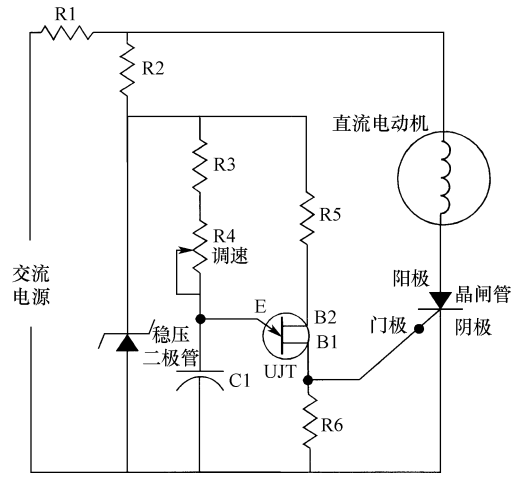


图 12-80 用于控制直流电动机的 SCR。UJT 连接到 SCR 的门极控制其触发延迟角

12.23.3 测试 SCR

有时可能需要测试 SCR 来确定其是否完好。由于 SCR 由 PN 结构成，可以用正向偏置和反向偏置测试来确定其完好还是故障。在该测试中，应该把正探针放在阳极上，把负探针放在阴极上。此时电阻表将仍然显示 SCR 是高阻。如果使用跨越线并且从阳极到门极连接正电压，SCR 将导通并具有低阻。SCR 将会保持导通，直到加到阳极和阴极的电压反向偏置，或直到加到阳极和阴极的电压减小到零。可以把电阻表极性开关切换到相反的设置，或者可以移除一个探针，SCR 将停止导通。保持 SCR 导通的电流值大约是 4～6mA。当设置为电阻挡以保持 SCR 导通时，一些高阻抗数字电压/电阻表将不能提供足够的电流。如果是这样的情况，可能需要用模拟电阻表测试 SCR。模拟电阻表是一种有一个指针和一个刻度尺的电阻表。此外，也应该测试 SCR 的反向偏置电阻，以确保其是高阻。有时 SCR 不会导通，因为其阳极-阴极电路已经断开。若 SCR 一直保持导通，这意味着 SCR 短路。

12.24　三端双向晶闸管

三端双向晶闸管基本上是两个 SCR 背靠背并联，这样一个 SCR 将会导通交流信号的正半周而另一个将会导通交流信号的负半周。众所周知，SCR 只能控制一个方向的电压和电流，其单独使用时，应用限于直流电路。由于三端双向晶闸管像两个反向并联的 SCR，三端双向晶闸管的一部分可以控制交流电压的正半周，另一部分可以控制交流电压的负半周。图 12-81a 为三端双向晶闸管的电子符号，图 12-81b表示了其 P 型和 N 型材料的排列方式。三端双向晶闸管的端子称为主端 1（MT1）、主端 2（MT2）以及门极。图 12-81c 为典型的三端双向晶闸管半导体器件的例子。由于三端双向晶闸管基本上是两个反向并联的 SCR，MT1 和 MT2 没有任何特指的极性。

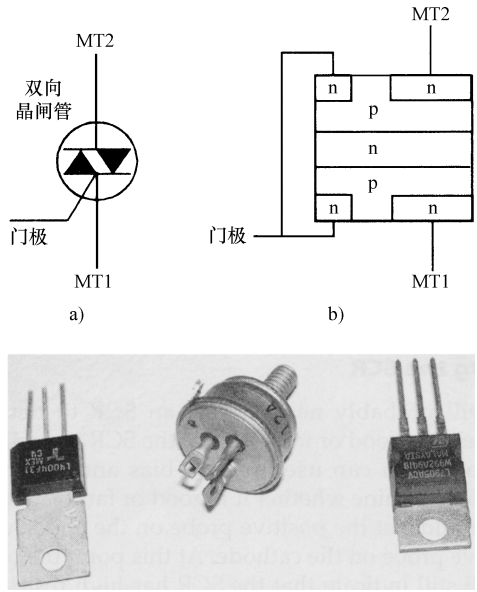


图 12-81　a）三端双向晶闸管的电气符号　b）三端双向晶闸管中的 P 型和 N 型材料　c）典型的三端双向晶闸管半导体器件

12.24.1　三端双向晶闸管用作开关

三端双向晶闸管可以作为一个简单的通断开关用于电路中。在该类型的应用中，MT1 和 MT2 端子与交流负荷串联。当门极得到一个正脉冲信号时，三端双向晶闸管导通交流周期正半周。当交流电压波形从正峰值返回到 0V，三端双向晶闸管关闭。然后，交流电压波形的负半周到达三端双向晶闸管，其门极接收到一负脉冲可再次导通。

三端双向晶闸管看起来好像当施加交流电压时其导通并保持导通状态。连接到三端双向晶闸管的负荷将得到全部交流正弦波，就像连接了一个简单的单相开关。主要的区别是，三端双向晶闸管开关可用于数百万通断开关周期。三端双向晶闸管开关的另一个优点是，门极脉冲可以是一个很小的电压或电流。这使得三端双向晶闸管可以用于温度控制，其中恒温器的温度感应部分可以是一个被称为热敏电阻的小型固态感应元件。传感元件也可以是玻璃球中的一窄汞条，很准确但只能承载少量电压和电流。

三端双向晶闸管另一个有用的开关应用是固态继电器。如图 12-82 所示，恒温器用于控制三端双向晶闸管，给油冷却器电磁线圈通电，以确保液压油保持正确的温度。温度感应元件连接到三端双向晶闸管的门极。当温度升高时，恒温器发送信号到三端双向晶闸管的门极。流过门极的小电压足以导通三端双向晶闸管并为电磁阀提供电压。

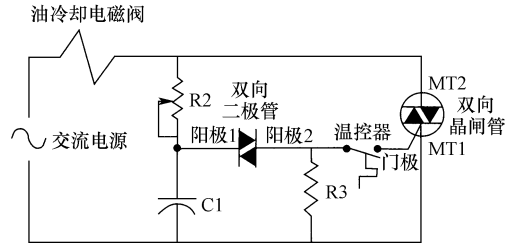


图 12-82　三端双向晶闸管用作开关，控制油冷却器电磁铁的电压，以确保液压油保持冷却。三端双向晶闸管接收到来自通过温度感应元件的小电压门极信号

12.24.2　三端双向晶闸管用于变压控制

三端双向晶闸管也可以用在变压控制电路中，因为其可以在正半周期和负半周期的任何时候打开，与 SCR 用于直流电路应用的控制方式大致相同。在该类应用中，三端双向二极管用于接收可以延迟 0° ~ 180°的正负脉冲，来控制通过三端双向晶闸管的电流值。这种电路可用于控制提供给电热元件的电压和电流值。通过调节图 12-82 中的 R2 可以将电流和电压值控制在 0 到最大值之间，从而准确地控制温度。电阻式温度传感器可以用来代替固定电阻 R2，系统将能够维持机舱的温度或控制液压系统的油温。图 12-83 表示了三端双向晶闸管用于控制交流电压源供电的电热元件。一个可变电阻与一个电容器连接，为三端双向二极管提供振荡脉冲。由于电

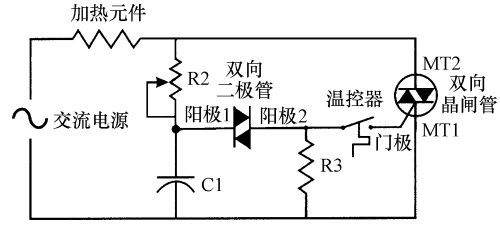


图 12-83　三端双向晶闸管用于改变交流电热元件的电压。注意，双向二极管用于提供三端双向晶闸管门极的正负脉冲

阻和电容连接到交流电压源，脉冲将是有正有负的，就像交流正弦波改变极性一样。三端双向晶闸管连接到同一交流电压源，使得从双向二极管到其门极的脉冲的时间总是与到达三端双向晶闸管主端的电压极性同步。

12.24.3　测试三端双向晶闸管

由于三端双向晶闸管由 P 型材料和 N 型材料构成，故可以像其他结器件一样测试。唯一需要记住的是，由于三端双向晶闸管本质上是两个反向并联的晶体管，有些电阻表测试不会受到电阻表引线极性的影响。在三端双向晶闸管的第一次测试中，需要用电阻表测试 MT1 和 MT2 之间的连续性。当没有门极脉冲时，无论电阻表探针放在哪个端子上，这些端子之间的电阻都应为无穷大。图 12-84 表示了电阻表应该如何连接到三端双向晶闸管上。如图 12-84a 所示，电阻表正极探针连接到 MT1，负极探针连接到 MT2。由于门极没有施加电压，电阻应为无穷大。当来自 MT2 的电压加到门极时，三端双向晶闸管将导通，电阻表将显示低电阻。

从图 12-84b 中可以看到，电阻表正极探针连接到 MT1，负极探针连接到 MT2。当来自 MT2 的电压加到门极，三端双向晶闸管将导通，电阻表将显示低电阻。只有当门极信号来自相同的电压源如 MT1 时，三端双向晶闸管将保持导通。一旦电压源拆除，三端双向晶闸管将关断。如图 12-84c 所示，门极接受来自 MT2 的电压，三端双向晶闸管导通。

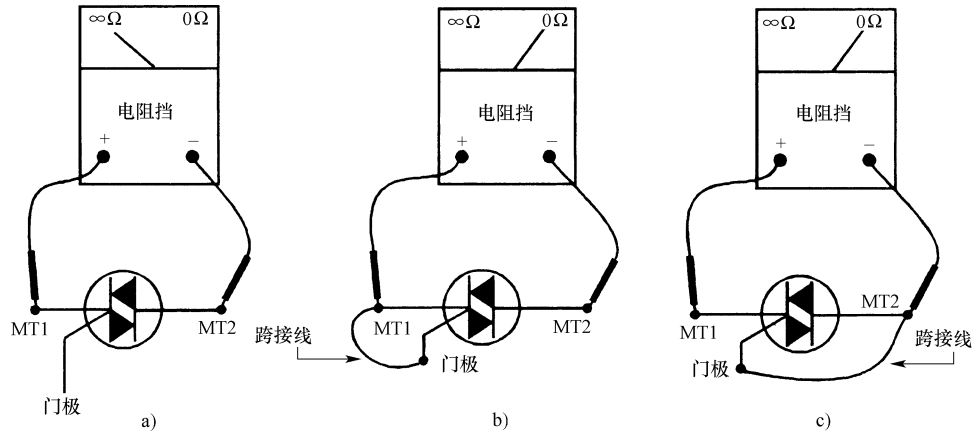


图 12-84　a）通过将电阻表正探针放在 MT2 上，把负探针放在 MT1 上测试三端双向晶闸管。当来自 MT2 探针的电压施加在门极上时，三端双向晶闸管导通　b）通过将电阻表正探针放在 MT1 上，把负探针放在 MT2 上测试三端双向晶闸管。当来自 MT2 探针的电压施加在门极上时，三端双向晶闸管导通　c）跨接线加在 MT2 和门极之间

12.25　实现直流-交流电能变换的逆变器

逆变器是专门设计用于将直流电压转变为交流电压的电路。众所周知，一些系

统，如逆变器、变频电动机驱动器以及小型风力发电机的功率控制系统，需要将交流电源转换成直流电源，然后将直流转换回交流。如果原始电源为交流电压的话，这听起来像是一种奇怪的交流输出方式，但在逆变器作用下，交流电压的频率可以为任何频率。逆变器的一个应用例子是，风力机以不同的转速运转，但输出交流电压频率需要非常接近60Hz。在小型风力机的电源情况下，交流电源电压需要变为直流，这样当电源中断时，可以储存在电池中。由于电压变为直流并储存在电池中，必须将其变回交流来使用，输出频率必须是固定的60Hz。

12.25.1　单相逆变器

最简单的逆变器是单相逆变器，其输入是直流电压，并将其转换为单相交流电压。单相逆变器可用于许多小型风力发电机中，因为这类发电机产生的是直流电压而不是交流电压，这些小型逆变器用于小型民用系统中。直流电能可能储存在电池中，以供没有风时使用。电池作为临时存储元件使用，就像一个缓冲区，当阵风时吸收短时爆发的能量。逆变器只是确保交流输出电压正好是60Hz。

12.25.2　六阶（段）逆变器

图12-85表示了使用4个晶体管的单相逆变器电气图。由于晶体管可以偏置成饱和与零之间的任何电压，这种类型的逆变器波形比传统的交流正弦波更加复杂。此图所示的波形是六阶（段）交流正弦波。两个晶体管用于产生正弦波的顶（正）

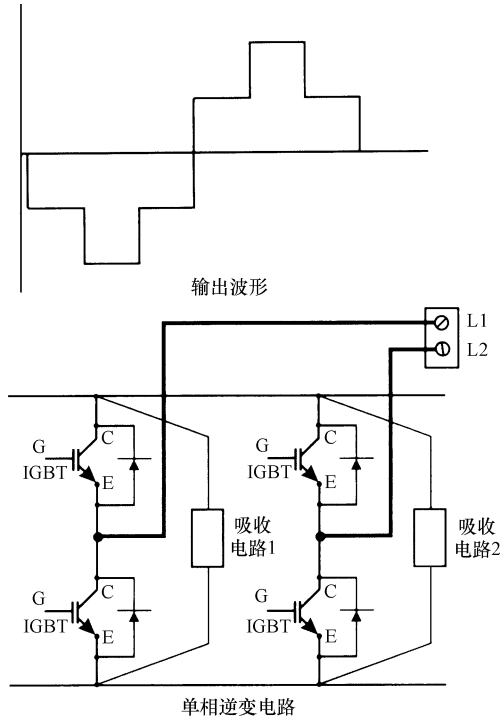


图12-85　单相绝缘栅双极晶体管（IGBT）逆变器电路图及其输出交流电压波形

部，剩下的两个晶体管用于产生正弦波的底（负）部。

当正弦波的正半部分产生，连接到正直流母线的晶体管分 3 个不同的步骤偏置。在第一步中，正半周期的 1/3 时间里晶体管偏置到大约一半电压。然后，正半周期的第二个 1/3 时间里，晶体管偏置到满电压。在正半周期剩余的 1/3 时间里，晶体管再次偏置到一半电压。该顺序在负半周期重复，连接到负直流母线的晶体管分三步充电，这三步用来产生负半周期。

由于需要六步产生交流正弦波的正负半周期，这种类型的变频器称为六阶（段）逆变器。该逆变器的交流电压在标为 L1 和 L2 的端子输出。虽然来自该逆变器的交流正弦波由六步形成，但电动机或其他负荷对于该电压反应为好像是一个传统的光滑交流正弦波。正弦波的时间设置为每个周期 16ms，频率是 60Hz。频率可以通过调节六步的每组时间得到调节。

12.25.3　三相逆变器

三相逆变器对于需要高电压和大电流的工业应用更加有效。基本电路和工作原理类似于单相晶体管逆变器。图 12-86 表示了具有三对绝缘栅双极晶体管（IGBT）的三相逆变器，每一对晶体管就像单相六阶（段）逆变器中的晶体管对一样工作。每一对晶体管中连接到正直流母线的晶体管将会导通产生正半周期，连接到负直流母线的晶体管将导通以产生负半周期。

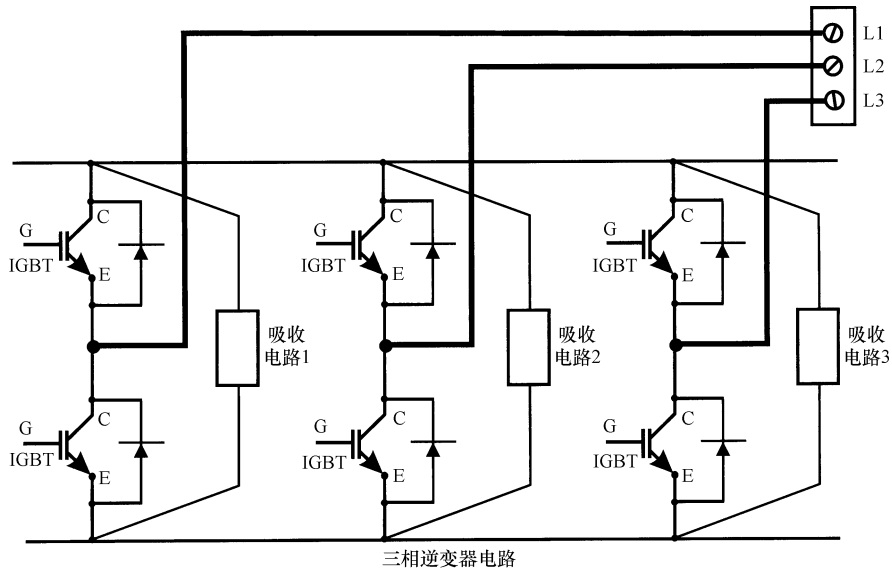


图 12-86　使用 6 个 IGBT 的三相逆变器电路图

这些晶体管的导通时序至关重要，因为晶体管必须在恰当的时间导通，以产生每个正弦波的 6 个阶段，必须与其他两相晶体管对的偏置同步，这样所有三相将会以正确的相序和相位产生。

12.25.4 可变电压逆变器

一个可变电压逆变器（VVI）基本上是一个六阶（段）单相或三相逆变器。当这些逆变器电路用于较大风力发电机时，随负荷的改变而改变电压值很必要。这些电路提供了一定的电压和有限的频率调节，因为可用振荡器来控制偏置电路。另外，许多早些的 VVI 逆变器使用晶闸管技术，SCR 组用于斩波电路来产生六阶段波形。微处理器变得廉价并得到广泛使用后，被用来控制晶体管型逆变器的偏置电路，使得六阶段逆变器电路可以更大范围地调节电压和频率。在风力机的逆变器中，频率需要随着风力发电机转速的改变而改变。

图 12-87 表示了 VVI 逆变器的电压和电流波形图。在该图中可以看出，电压由六步形成，电流结果看起来像一个交流正弦波。如果将示波器与该类逆变器的任意两个端子相连，将会看到这些波形。

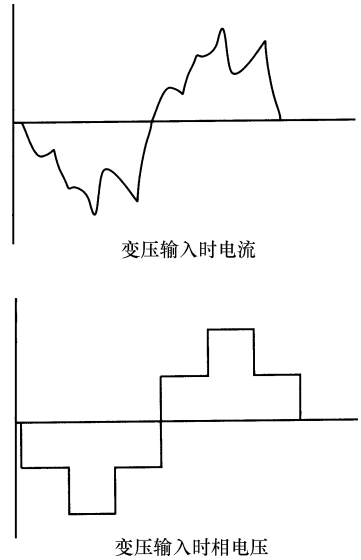


图 12-87 可变电压输入（VVI）逆变器的电压和电流波形

12.25.5 脉宽调制逆变器

为逆变器提供可变电压和可变频率的另一种控制方法是采用脉冲宽度调制（PWM）控制。这种类型的控制使用不同频率开通和关断晶体管。这会产生一个由在特定时间导通和关断的一系列方波组成的具备正弦波外观的独特波形。波形的轮廓实际上非常近似六阶（段）逆变器输出信号。这种类型的波形例子如图 12-88 所示。在该图中可以看到，波形的整体外观是一个交流正弦波。每个正弦波实际上是由多个方波脉冲组成，该方波脉冲由晶体管快速导通和关断产生。由于这些晶体管偏置可以控制，每个方波脉冲电压值可以调节，使得整组方波有一个正弦波的整体外观。如果观察 PWM 逆变器的电压波形，会发现交流正弦波轮廓很像 VVI 逆变器中原来使用的六阶（段）正弦波。当单个脉冲电压增加时，交流正弦波的电平高度也增加了。这增加了 PWM 逆变器提供的正弦波的总电压。

每个方波脉冲的宽度（时间）也可以调节，以改变构成交流正弦波的每个脉冲的周期。当正弦波的宽度改变时，也改变了正弦波的周期，这意味着频率也改变了。由于调节电压和频率相当复杂，PWM 逆变器使用微处理器来控制每个晶体管的偏置。如果晶闸管作为整流器的开关器件，微处理器将用于控制触发电路的相位角。

早期的 PWM 电路中使用一种特殊的晶闸管如 GTO 来产生方波脉冲。由三角载波组成的控制电路来保持电路的同步。锯齿波形送到控制每个晶闸管触发延迟角的振荡器电路中。现在的 PWM 逆变器使用晶体管，主要是因为其在更高的频率下可

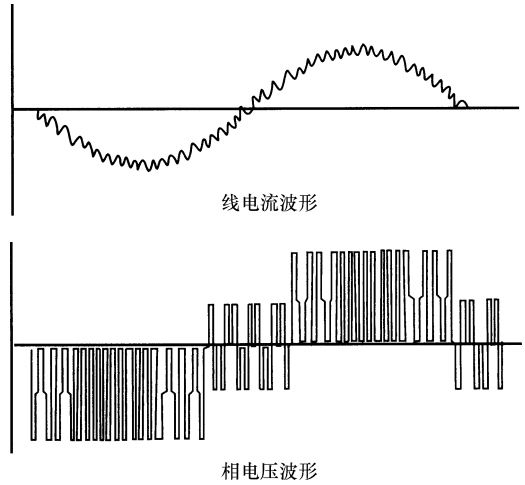


图 12-88　脉冲宽度调制（PWM）逆变器的电压和电流波形。注意，每个波形的整体外观是一个交流阶（段）正弦波，实际上由很多方波脉冲组成

以从零到饱和并回到零进行偏置。现代电路晶体管已经得到广泛使用，因为它们可以承受超过 1500A 的大电流。

12.25.6　电流源型逆变器

电流源型（CSI）逆变器产生的电压波形更像一个交流正弦波，而电流波形类似于最早按顺序循环通断 SCR 的逆变器的通断方波。电流源型（CSI）逆变器使用晶体管来控制输出电压和电流。晶体管的导通时间和关断时间可以调节，来改变逆变器的输出频率。每个波的幅值也可以调整，以改变输出电压值。CSI 逆变器像前面所讨论的逆变器，可以调节电压和频率，使用在固定频率或其他需要变电压的应用领域。图 12-89 表示了 CSI 逆变器的电压和电流波形。

12.25.7　交-交变频器

交-交变频器是设计用来将一种频率的交流电压直接转变为另一种频率的交流电压而不需要直流电压变换的电路。该电路的历史可以追溯到 20 世纪 30 年代德国使用汞弧整流器来控制铁路发动机频率的时期。这些原始装置的电源电压是固定的 50Hz 交流正弦波，这在欧洲很普遍。火车发动机使用低频率（16.6Hz），所以其电动机会缓慢转动，产生大量转矩。交-交变频器的输入电路使用大型变压器，输出部分使用晶闸管来调节输出级的周期，

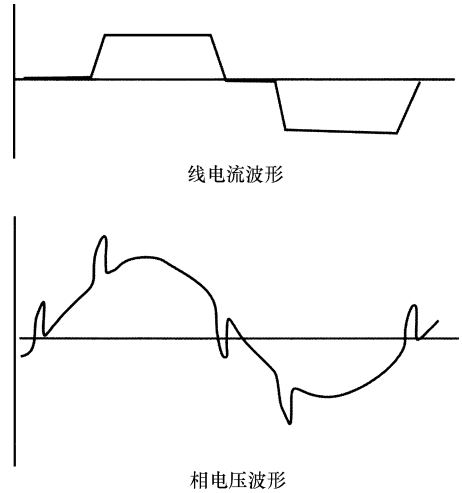


图 12-89　电流源型（CSI）逆变器的电压和电流波形

从而改变频率。

由于现代电力电子技术提供了许多方法来控制电压和频率，交-交变频电路一般用于电力传动系统。事实上，在调节交流电压频率并输出前，首先将交流电压转换成直流电压有许多优点。例如，当交流输入电压整流成直流并滤波时，所有瞬态信号和电压尖峰被去除，这样，当直流转换回交流时，输出电路有效地与输入电路隔离。

12.25.8 逆变器应用

逆变器很少作为独立电路，通常与其他电路结合使用，如电源中的整流器和滤波电路，它们为逆变器需要的直流电压提供电源。逆变器还可作为很多类型直流电源的直-直变流器的组成部分。如今风力机逆变器的主要用途是将发电机的可变频率变为交流并网所需要的固定频率。

简 答 题

1. 解释为什么并联电路的每条支路电压与电源电压相同。
2. 解释符号 M、k、m 和 μ 的含义，并举例如何在测量单位中使用。
3. 讨论开关与负荷串联的优点。
4. 解释术语“无穷大电阻”。
5. 列举当用电阻表进行电阻测量时需要注意的两个事项。
6. 解释第一次测量未知电压或电流时，为什么应该将电压表或电流表设为最大量程。
7. 哪两种材料结合在一起形成 P 型和 N 型材料？
8. 解释二极管（PN）结的工作原理并画出交流输入波形和直流输出波形。
9. 识别晶体管的端子并解释其工作原理。
10. 解释电力电子变换器（逆变器）的工作原理。

选 择 题

1. 在串联电路中，每部分的电流（　　）。

a. 总是零

b. 相同

c. 等于电压

2. 1mA 是（　　）。

a. 1A 的 1/1000

b. 1A 的 1/1000000

c. 10^6A

3. 如果温控开关、高压开关和油位开关与液压马达串联，并且油位开关由于低油位断开，电动机将（　　）。

a. 仍然运行，因为其他两个开关仍然闭合

b. 不受影响，因为没有其他负荷与其串联

c. 停止运行，因为电流将为零

4. 并联电路的电压会（　　）。

a. 由于并联额外电阻而增加

b. 由于并联额外电阻而减小

c. 不受并联额外电阻的影响，而保持与并联支路相同

5. 并联电路电阻会（　　）。

a. 由于并联额外电阻而增加

b. 由于并联额外电阻而减小

c. 当并联电阻时，可能增加或减小，取决于电阻大小

6. 逆变器（　　）。

a. 将直流电压转变为交流电压并转换回直流电压

b. 将交流电压转变为直流电压并转换回交流电压

c. 将直流频率转变为一个新的直流频率

7. 当多支路并联电路的一条支路断开时，其他支路的电压（　　）。

a. 减小到零

b. 增加，因为更少的电阻使用电压

c. 保持与电源电压相同

8. 用钳形电流表测量交流电流时，应该（　　）。

a. 断开仪表的爪并将其放在想要测量电流的导线周围

b. 断开电路并放置仪表探针使得仪表与负荷串联

c. 关闭电路所有电源，这样不会受到电击

9. 整流二极管（　　）。

a. 将直流电压转变为交流电压

b. 将交流电压转变为直流电压

c. 可以用作数字七段显示器

10. 当进行电压测量时，应该（　　）。

a. 将仪表探针放在负荷两端

b. 在电压读数时关闭电路所有电源，这样不会受到电击

c. 断开电路并放置仪表探针使得仪表与负荷串联

关于本书

本书涵盖了大、中、小型风力发电机运行的各方面内容。本书从最基本的概念开始，由简入繁，图文并茂地解释了从叶片捕获风能到发电机将机械能转换为电能的完整过程与原理，内容包括用于偏航、变桨驱动的电气及液压系统，由传动链、齿轮箱构成的机械系统，以及实现电力变流及运行控制的电气与电子电路等。各章节中均包括大量的照片、插图以及数据表格，各章节内容可根据具体风力发电课程的需求单独或系统地采用。

为中华崛起传播智慧

地址：北京市百万庄大街22号
邮政编码：100037

电话服务
社服务中心：010-88361066
销售一部：010-68326294
销售二部：010-88379649
读者购书热线：010-88379203
网络服务
教材网：http://www.cmpedu.com
机工官网：http://www.cmpbook.com
机工官博：http://weibo.com/cmp1952
封面无防伪标均为盗版

策划编辑◎付承桂

国际视野　科技前沿

国际电气工程先进技术译丛

传播国际最新技术成果　搭建电气工程技术平台

《风力发电技术与工程应用》
《风资源评估：风电项目开发实用导则》
《电池系统工程》
《微电网和主动配电网》
《双馈感应电机在风力发电中的建模与控制》
《高性能交流传动系统 —— 模型分析与控制》
《光伏发电系统的优化 —— 建模、仿真和控制》
《覆冰与污秽绝缘子》
《高压直流输电——功率变换在电力系统中的应用》
《MATLAB数值分析方法在电气工程中的应用》
《太阳能利用技术及工程应用》
《超级电容器的应用》
《小型风力机：分析、设计与应用》
《太阳电池、LED和二极管的原理：PN结的作用》
《风力发电系统 —— 技术与趋势》
《电力系统高级预测技术和发电优化调度》
《大规模储能技术》
《风电系统电能质量和稳定性对策》
《传热学：电力电子器件热管理》
《现代电力电子学与交流传动》
《功率半导体器件：原理、特性和可靠性》
《风能系统——实现安全可靠运行的优化设计与建设》
《储能技术》
《光伏系统工程》（原书第3版）
《光伏与风力发电系统并网变换器》
《车辆能量管理：建模、控制与优化》
《纯电动及混合动力汽车设计基础》（原书第2版）
《电动汽车技术、政策与市场》
《永磁无刷电机及其驱动技术》
《先进电气驱动的分析、建模与控制》
《智能电网可再生能源系统设计》
《风力发电工程指南》
《柔性交流输电系统在电网中的建模与仿真》
《风电并网：联网与系统运行》
《海底电力电缆——设计、安装、修复和环境影响》
《光伏技术与工程手册》
《风力发电的模拟与控制》
《风电场并网稳定性技术》
《智能电网中的电力电子技术》
《高效可再生分布式发电系统》
《分布式发电——感应和永磁发电机》
《电力系统谐波》
《风能与太阳能发电系统——设计、分析与运行》（原书第2版）
《瞬时功率理论及其在电力调节中的应用》
《风力机控制系统原理、建模及增益调度设计》
《高压输配电设备实用手册》
《电力变流器电路》
《电力系统中的电磁兼容》
《超高压交流输电工程》（原书第3版）
《高压直流输电与柔性交流输电控制装置——静止换流器在电力系统中的应用》
《配电可靠性与电能质量》

PEARSON
ALWAYS LEARNING ALWAYS LEARNING ALWAYS LEARNING

PEARSON
www.pearson.com

上架指导 工业技术／电气工程／新能源

ISBN 978-7-111-47585-9

ISBN 978-7-111-47585-9
9 787111 475859 >

定价：88.00元